

# Origem e evolução das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial

*Origin and evolution of the mantle rocks of Saint Peter and Saint Paul massif, Equatorial Atlantic Ocean*

Susanna Eleonora Sichel | Akihisa Motoki | Thomas Ferreira da Costa Campos | Jennifer Angel-Amaya | Thais Cristina Vargas Garrido | Marcia Maia | Mark David Kurz | Mauro Satake Koga | José Antonio Baptista Neto | Kenji Freire Motoki | Marcus Aguiar Gorini | Peter Szatmari

## resumo

Este trabalho apresenta os resultados de estudos petrológicos, geoquímicos e tectônicos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e áreas adjacentes no Oceano Atlântico Equatorial. O arquipélago corresponde ao ponto culminante de uma elevação morfológica denominada de Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo. Esta cadeia é constituída por rochas ultramáficas do manto abissal, localizado na interseção da falha transformante de São Paulo com a cordilheira meso-oceânica. A Cadeia de São Pedro e São Paulo é dividida em duas elevações: a elevação sul, composta por peridotitos granulares não deformados e fortemente serpentinizados e a elevação norte, que inclui o arquipélago e é formada por peridotitos intensamente milonitizados e pouco serpentinizados. Ambos os tipos de peridotitos, milonitizados e não deformados, são enriquecidos em U, Th, Ba, elementos terras raras leves e gases nobres, principalmente o He. Este enriquecimento deve-se aos processos de milonitização de um manto previamente afetado por metassomatismo na elevação norte. Os peridotitos não deformados da elevação sul são fraturados, facilitando a introdução de elementos incompatíveis e radiogênicos como Rb

e U durante a infiltração da água do mar no processo de serpentinação. A razão isotópica de Os sugere um manto com idades modelo de 0,32 Ga a 1,1 Ga. A variação nos conteúdos de Re, Os e Pt pode ser explicada por meio dos fluidos metassomáticos, possivelmente originados de uma zona de subducção pretérita. Esta cadeia peridotítica foi submetida a um intenso tectonismo, com taxa de soerguimento de 1,5mm/ano nos últimos 6.000 anos. Mecanismos focais de terremotos apontam compressão norte-sul. Esse esforço é causado pela direção oblíqua entre a falha transformante de São Paulo e o movimento transcorrente da Placa Sul-Americana em relação à Africana. O Oceano Atlântico Equatorial é considerado uma região mantélica de baixa temperatura (*cold-spot*). A elevação sul da cadeia representa um *megamullion*, que foi soerguida anormalmente pela compressão norte-sul. A elevação norte pode ter sido originada por uma falha transformante e, posteriormente, deformada por tectonismo ainda ativo. Essa parece ser a força responsável pelo soerguimento desta elevação norte, desde a profundidade do manto subcrustal até o atual nível do mar.

**Palavras-chave:** Arquipélago de São Pedro e São Paulo | Oceano Atlântico Equatorial | falha transformante | exumação do manto | geoquímica

## abstract

We present results of petrology, geochemistry, structural geology, and geotectonics studies of the Saint Peter and Saint Paul Rocks and the adjacent areas, Equatorial Atlantic Ocean. The islets correspond to the highest point of a morphologic elevation called Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, which is made up of abyssal mantle peridotite. The Peridotite Ridge is divided into the north elevation and South Elevation by a graben with east-west direction. The South Elevation is formed by undeformed peridotites strongly serpentinized, and the north elevation, including the islets, is formed by mylonitic peridotite with lower degree of serpentinization. Both types of peridotites are enriched in U, Th, Ba, and Light Rare Earth Elements, as well as Noble Gases, mainly He. The enrichment is related to milonitization processes affecting a previously metassomatized mantle, especially at the north elevation. The serpentinization of the non milonitized rocks of the South elevation, are strongly fractured and therefore, allows the introducing of radiogenic incompatible elements such as Rb and U through sea water infiltration. The Os isotopic ratio suggests existence of materials originated from depleted mantle with model age of 0.32 Ga and 1.1 Ga. The Re, Os, and Pt variation indicate that the mantle was metassomatized by the fluids. The altitude of the Flandrian wave-cut bench and  $^{14}\text{C}$  datings of the coral fossils indicate an uplift rate of 1.5mm/year in the last 6.000 years. The tectonic fractures of the islets and the focal mechanism earthquakes indicate an existence of north-south compression stress. This compression is originated from the oblique direction between the transform fault and the strike-slip movement of the South America Plate relative to the Africa Plate. The Equatorial Atlantic Ocean is underlain by low-temperature mantle. The South Elevation from this ridge forms a megamullion. The north elevation was originated from an old transform fault and later submitted to brittle fracturing and intense uplift by compression stress.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

**Keywords:** Saint Peter and Saint Paul Rocks | Equatorial Atlantic Ocean | transform fault | mantle exhumation | geochemistry

## introdução

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPP) (fig. 1) situa-se no Oceano Atlântico Equatorial, entre  $00^{\circ}55'N$  e  $29^{\circ}21'W$ , aproximadamente 1.100km a nordeste de Natal, Rio Grande do Norte. A área total emersa é de  $0,013\text{km}^2$ , com ponto culminante de 21m de altitude (Ilha Nordeste). A região do ASPP corresponde à zona de contato entre as placas Sul-Americana e Africana (fig. 2).

A maioria das ilhas oceânicas são topos de edifícios vulcânicos. Entretanto, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo não é de origem vulcânica e sim formado por peridotitos serpentinizados e deformados do manto abissal.

Darwin (1844) foi o primeiro a identificar que essas ilhas não possuem origem vulcânica. Tilley (1947) descreveu-as como dunitos milonitizados, enquanto Melson (1967) as classificou como sendo rochas derivadas do manto.

O primeiro estudo detalhado se deve à expedição do R/V Atlantis II do Instituto Oceanográfico de Woods Hole em 1965 (Thompson, 1981). As informações petrológicas e morfológicas obtidas nas expedições subsequentes revelaram a existência de três segmentos intratransformantes, com o comprimento aproximado de 20km a 25km com direção norte-sul. Foram identificadas pelo menos quatro falhas transformantes com

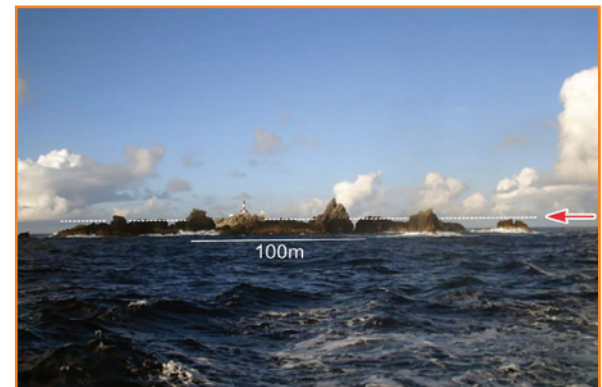
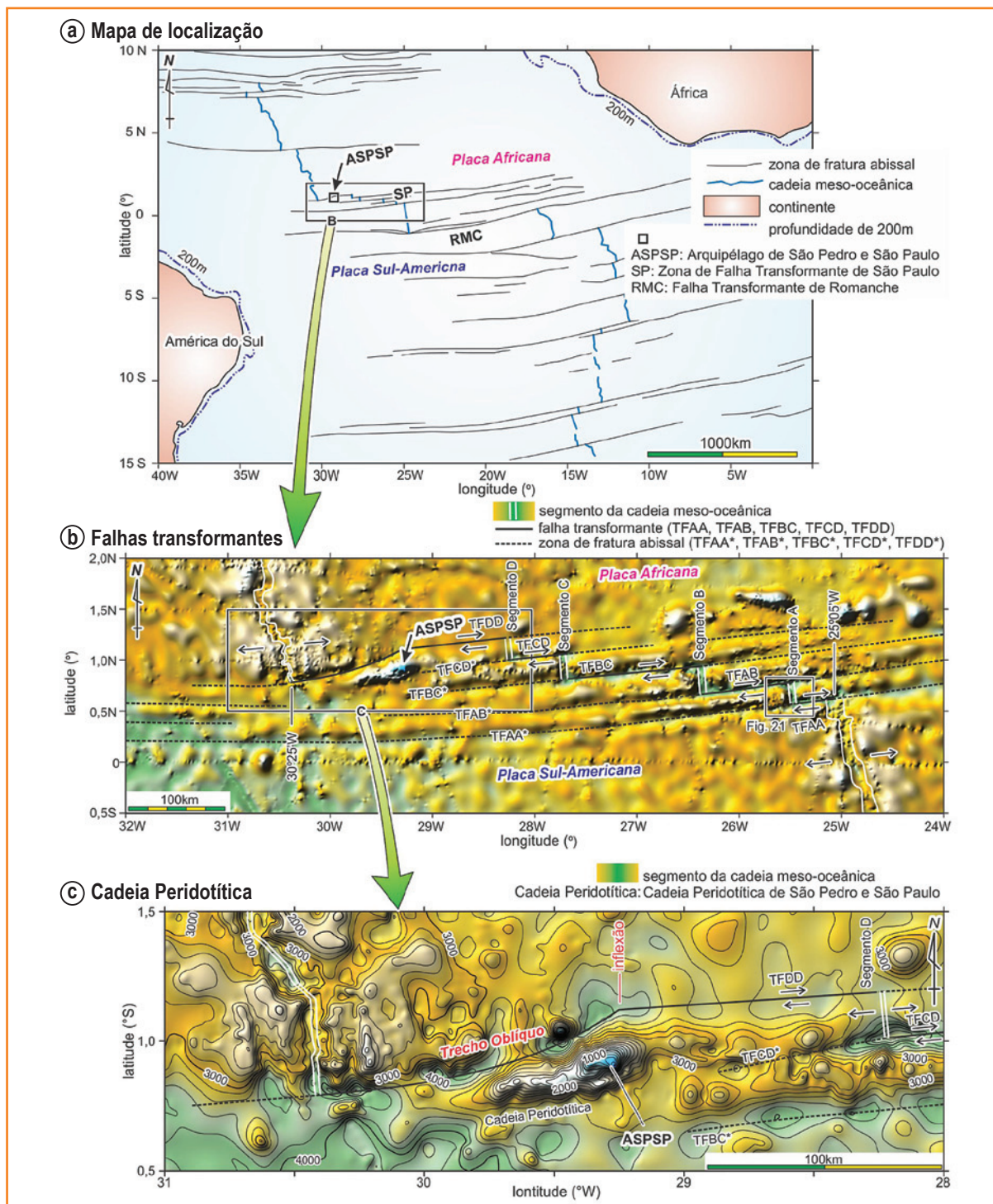


Figura 1 – Arquipélago de São Pedro e São Paulo. A linha tracejada branca e a seta vermelha indicam a plataforma de abrasão marinha do Flandriano. A fotografia é de crédito da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM).

Figure 1 – São Paulo and São Pedro Archipelago. The white dashed line and red arrow indicate Flandrian wave cut bench. The photo image is of credit of the Secretary of Interministerial Committee of Marine Resources of Brazilian Federal Government (SECIRM).



**Figura 2**  
Mapa de localização do Arquipélago de São Pedro e São Paulo com base na batimetria prevista (modificado de Motoki *et al.*, 2009): a) mapa de localização; b) Sistema de Falhas Transformantes de São Paulo e c) Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo. TFAA, TFAB, TFBC, TFCD e TFDD são falhas transformantes e TFAA\*, TFAB\*, TFBC\*, TFCD\* e TFDD\* são as zonas de fratura abissal correspondentes. A área para a figura 20 é indicada na ilustração b.

**Figure 2**  
Locality map of the São Paulo and São Pedro Archipelago, based on the predicted bathymetry (modified from Motoki *et al.*, 2009): a) locality map; b) São Paulo Transform Fault System and c) São Pedro and São Paulo Peridotite Ridge. TFAA, TFAB, TFBC, TFCD are transform faults and TFDD. TFAA\*, TFAB\*, TFBC\*, TFCD\* and TFDD\* are the corresponding abyssal fracture zones. The area for the figure 20 is indicated on the illustration b.

direção leste-oeste com deslocamento dextral total de 580km em uma faixa de 80km de largura (fig. 2). A velocidade de expansão é 1,5cm/ano para cada lado e a diferença máxima da idade entre os blocos é de 36 Ma (Udintsev, 1996; Schilling *et al.*, 1995; Bonatti *et al.*, 1993). Foram realizados 13 mergulhos até a profundidade de 4.800m (Hekinian *et al.*, 2000; Sichel *et al.*, 2008) no sistema de falhas transformantes e do

maço peridotítico de São Pedro e São Paulo, utilizando o submersível Nautilo do Ifremer (1997-1998). A região é caracterizada por intensa atividade tectônica e limitada atividade magmática. O tectonismo ativo é representado por terremotos rasos com intensidade 4,0 a 6,0 na escala Richter.

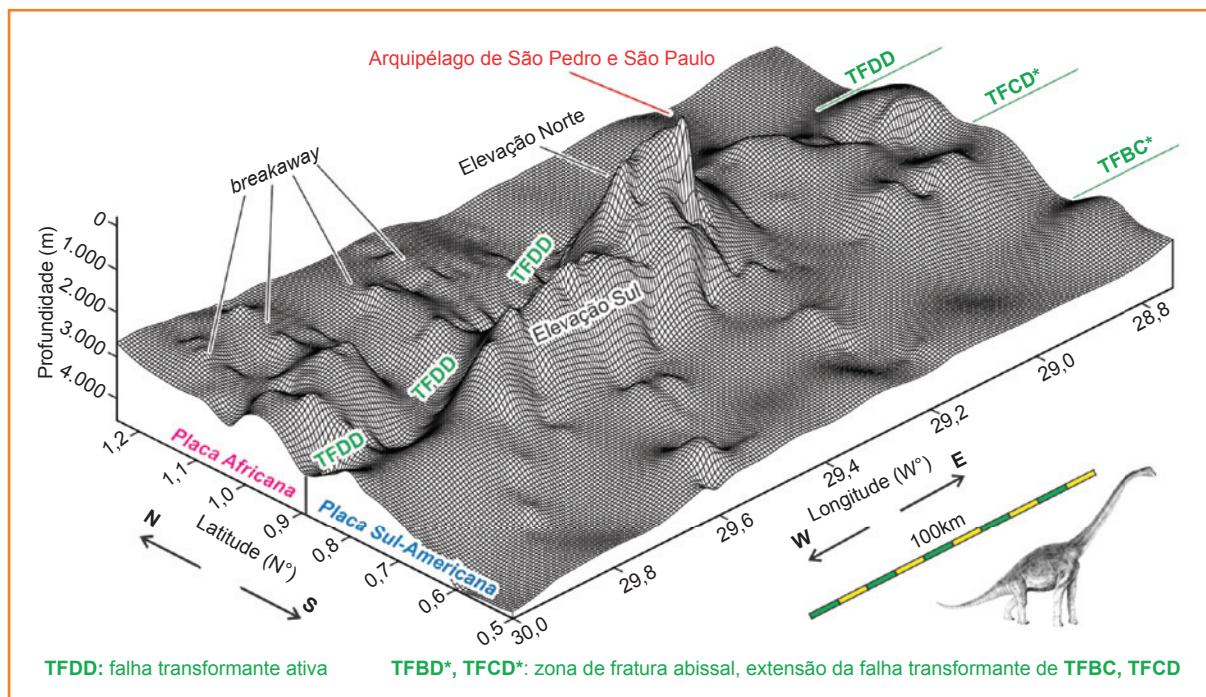
O arquipélago situa-se no topo de uma elevação morfológica de 100km de comprimento, 25km de

Figura 3

Morfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo baseada na batimetria predita (modificado de Motoki et al., 2009). O graben entre a elevação norte e elevação sul é pouco expressivo nesta figura devido à resolução limitada da batimetria predita. Os símbolos para as falhas transformantes e as zonas de fratura abissal são iguais àqueles da figura 2.

Figure 3

Submarine morphology of Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge based on predicted bathymetry (modified from Motoki et al., 2009). The graben between the north elevation and south elevation is little expressive on this figure due to the limited resolution of the predicted bathymetry. The symbols for the transform faults and abyssal fracture zones are the same of the figure 2.



largura e 3.800m de altura relativa (fig. 3). É a única localidade do Oceano Atlântico em que ocorre a exposição *in situ* do manto abissal acima do nível do mar. Seis mergulhos profundos na região oceânica da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo revelaram uma predominante quantidade de rochas peridotíticas e limitadas ocorrências de gabro, dolerito e basalto. Foram observadas diversas falhas normais, que constituem um graben que divide o maciço em dois flancos: o norte e o sul (fig. 4).

Sete mergulhos adicionais ocorreram em dois dos quatro segmentos intratransformantes da cadeia meso-oceânica, revelando lavas com vidro

vulcânico preservado, gabros e grande quantidade de exposição de peridotitos, sugerindo baixa atividade vulcânica em relação ao tectonismo (Hekinian et al., 2000; Koga, 2011).

## petrografia

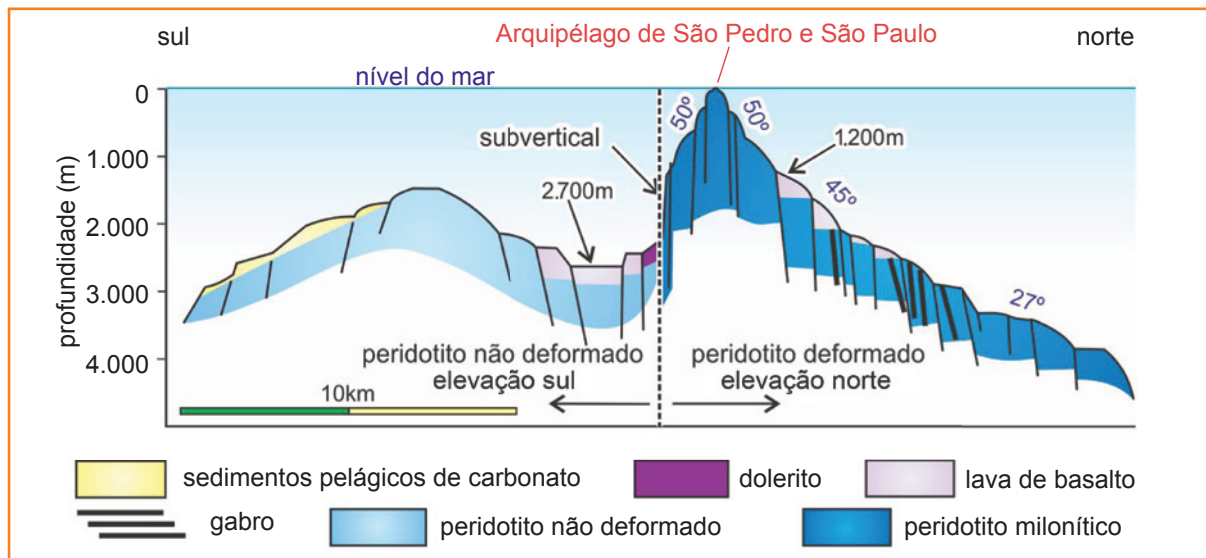
As amostras para as análises petrográficas foram coletadas tanto na parte emergsa da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo como na parte submersa,

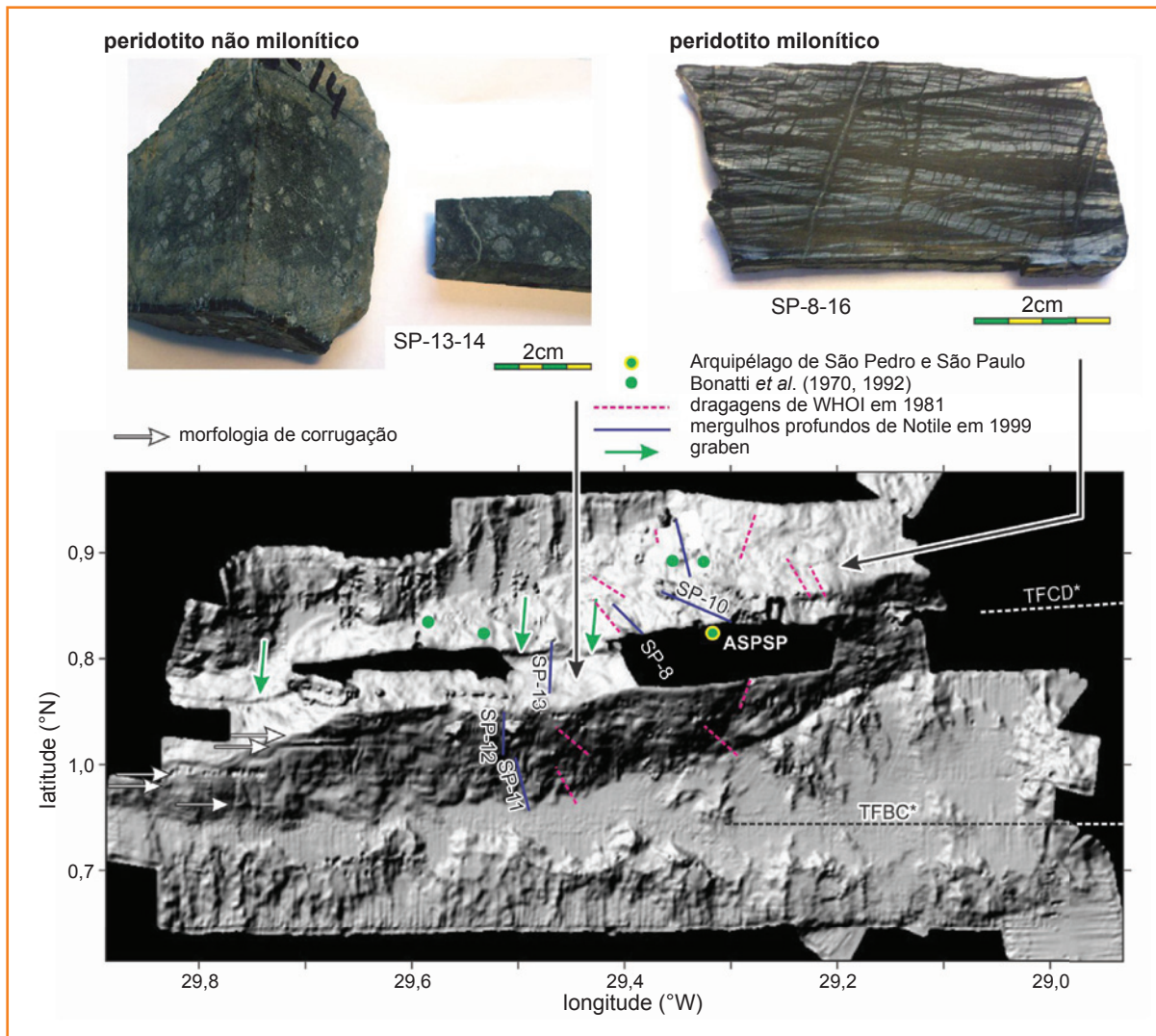
Figura 4

Perfil composto da morfologia submarina da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo com direção norte-sul, com base nos seis mergulhos profundos pelo submersível Nautille (modificado de Hekinian et al., 2000).

Figure 4

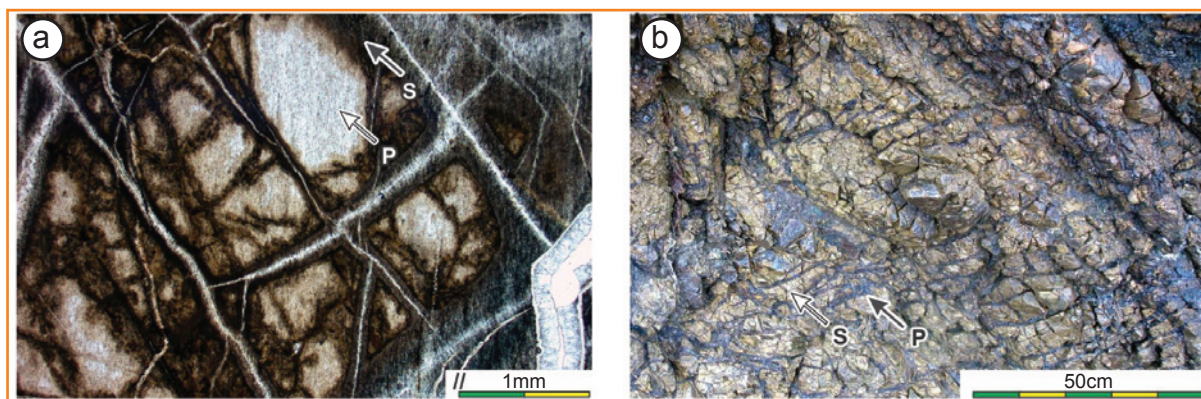
Composite cross-section of submarine morphology of Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge in north-south direction based on the six deep dives by submersible Nautille (modified from Hekinian et al., 2000).





**Figura 5**  
 Mapa batimétrico da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, apresentando as localizações dos mergulhos profundos: SP-8, SP-9, SP-10 no flanco norte da elevação norte; Sp-11, SP-12 no flanco sul da elevação sul; SP-13 no graben central entre as elevações norte e sul. As fotografias a e b exibem, respectivamente, as amostras SP-9-10 do flanco norte, peridotito milonitizado e serpentinizado a 3.335m de profundidade e SP-12-12 do flanco sul, peridotito não deformado e serpentinizado a 1.394m de profundidade.

**Figure 5**  
 Bathymetric map of Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, showing deep dive sites: SP-8, SP-9, SP-10 on the north flank of the north elevation; Sp-11, SP-12 on the south flank of the South Elevation; SP-13 at the central graben between the north and south elevation. The photos a and b exhibit respectively the samples SP-9-10 of north flank which is serpentinized mylonitic peridotite collected from 3.335m of depth, and SP-12-12 of south flank, undeformed serpentinized peridotite at the depth of 1.394m.



**Figura 6** – Estruturas do tipo Kernel do peridotito serpentinizado do Arquipélago de São Pedro e São Paulo: a) fotomicrografia da textura do tipo Kernel, nicóis paralelos e b) estrutura macroscópica do tipo Kernel. P - peridotito não serpentinizado (parte clara); S - peridotito serpentinizado (parte escura).

**Figure 6** – Kernel structures of the serpentinized peridotite of the Saint Peter and Saint Paul Rocks: a) Photomicrography of the Kernel texture, parallel nicol and b) Macroscopic Kernel structure. P - non-serpentinized peridotite (light coloured); S - serpentinized peridotite (dark coloured).

através de seis mergulhos profundos com o submersível científico Nautilo (Ifremer), em uma faixa de profundidade que variou entre 3.727m a 1.229m (fig. 5).

As rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo são classificadas em dois grupos baseados na textura e assembleia mineral: peridotitos miloníticos, intensamente deformados no flanco norte e peridotitos não deformados e fortemente serpentinizados no flanco sul.

As rochas emersas e submersas da elevação norte (fig. 4) caracterizam-se por forte recristalização e deformação milonítica em condição dúctil-rúptil, observada na recristalização da olivina, típica de região cisalhada. Essa textura foi importante na limitação da percolação de fluidos hidrotermais, restringindo de certa forma o grau de serpentinização e perda de gases nobres nesta área do manto abissal (Angel-Amaya *et al.*, 2010; Angel-Amaya, 2011).

Contudo, o tectonismo posterior à milonitização gerou um sistema de diaclasamento que facilitou o processo de serpentinização a partir das diáclases, formando textura de tipo *Kernel* (fig. 6). Ou seja, a serpentinização envolve um núcleo de milonito peridotítico não serpentinizado (Campos *et al.*, 2003), contrastando com os peridotitos não deformados e com forte serpentinização da elevação sul (fig. 4).

## peridotitos milonitizados

O grupo dos peridotitos milonitizados formadores da elevação norte exibe dois tipos de texturas

de deformação: 1) textura de fluxo e de recristalização e 2) textura de intercalação fina de lâminas claras e escuras. A textura de fluxo e de recristalização (fig. 7a e 7b) mostra feições tipicamente desenvolvidas na transição do limite rúptil-dúctil, alternando as estruturas primárias e diminuindo o tamanho dos cristais de olivina, que formam uma matriz ligeiramente orientada e, algumas vezes, maciça. Cristais de espinélio e piroxênio ocorrem como porfiroclastos e são mais resistentes à recristalização, no entanto, possuem indícios de deformação tais como: extinção ondulante, bordas irregulares e sombras de pressão.

O segundo tipo de textura é representado por intercalação fina de lâminas escuras de material afanítico, compostas principalmente por anfibólio, alternando com bandas claras de olivina e clinopiroxênio recristalizados (figs. 8a, 8b e 8c). Os planos de cor marrom da fotomicrografia (fig. 8a) são constituídos por porfiroclastos de hornblenda e matriz de olivina, espinélio e clinopiroxênio. Observam-se dois tipos de anfibólio, pargasita e mais raramente kaersutita. A pargasita é interpretada como anfibólio primário, enquanto a kaersutita como o resultado de percolação de fluidos metassomáticos. Além do anfibólio, ocorrem flogopita e apatita, que são interpretados como indícios de metassomatismo do manto, por apresentarem enriquecimento em elementos incompatíveis disponíveis em fluido metassomático silicatado ou gasoso, como  $H_2O-CO_2$  (Roden *et al.*, 1984). Esses peridotitos milonitizados evidenciam menor grau de serpentinização (< 30%) em relação aos peridotitos não deformados da elevação sul (figs. 4 e 5).

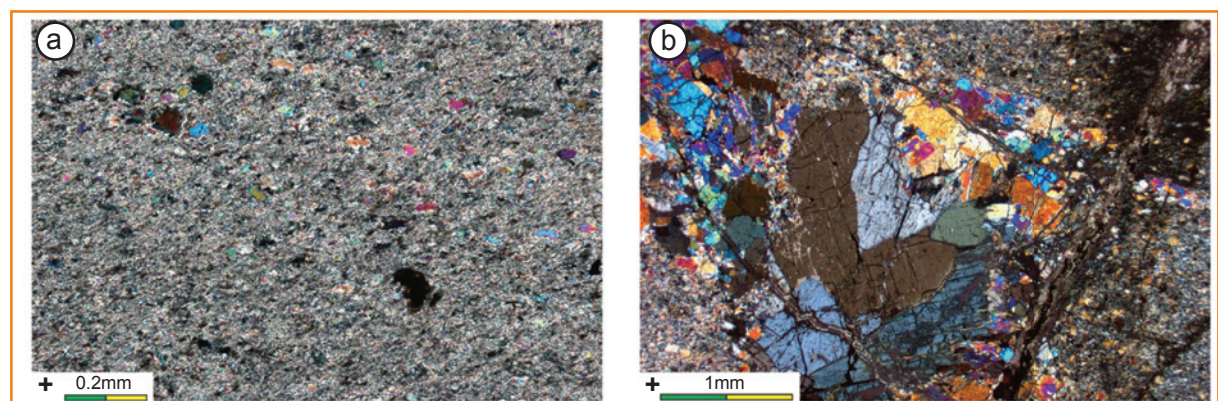


Figura 7 - Fotomicrografia da textura de recristalização do peridotito milonítico: a) amostra SP-9-11 coletada durante o mergulho à profundidade de 3.253m e b) amostra com porfiroclasto da Ilha Belmonte, Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Figure 7 - Photomicrography of recrystallization texture of mylonitic peridotite: a) sample SP-9-11 collected during the deep dive from the depth of 3.253m and b) sample of the Belmonte Island, Saint Peter and Saint Paul Rocks, with porphyroclast.

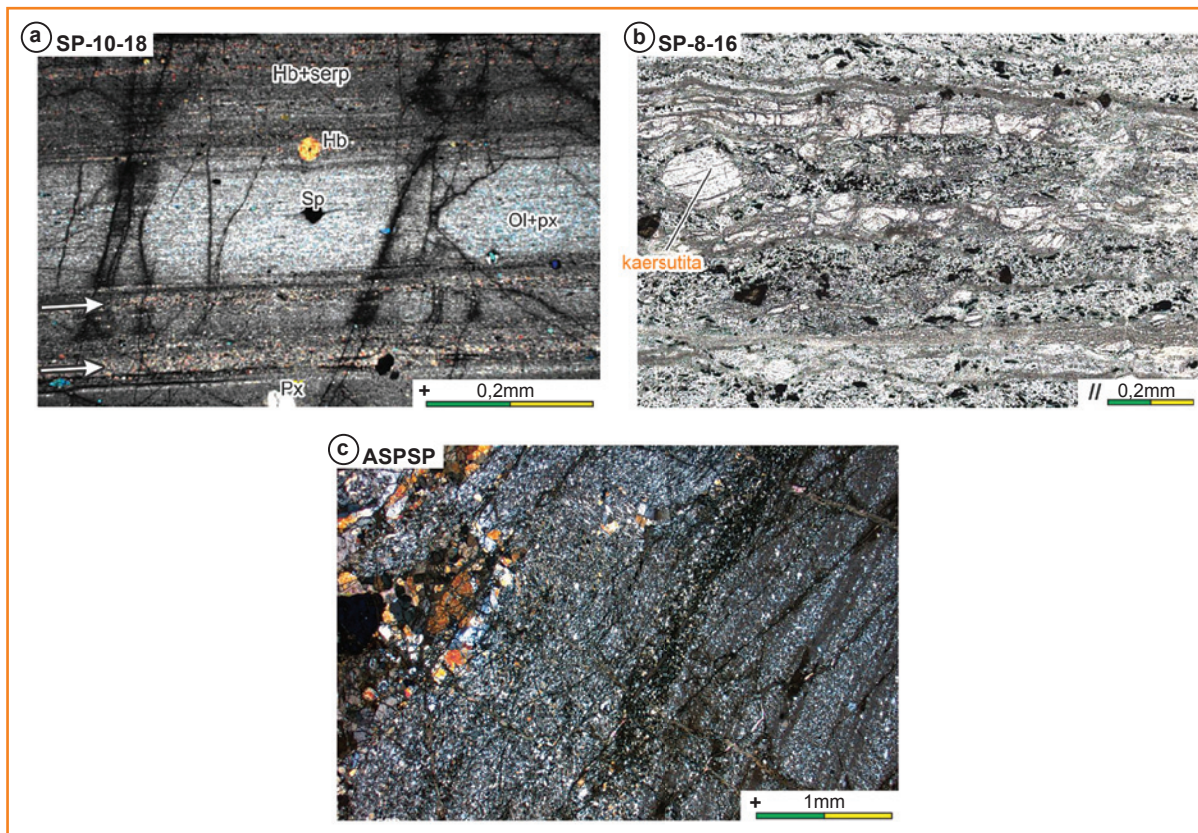


Figura 8 - Fotomicrografias de peridotitos milonitizados de deformação rúptil-dúctil (Angel-Amaya, 2010; Campos *et al.*, 2003): a) SP-10-18, amostrada na profundidade 1.351m, mostrando a textura laminada do peridotito milonitizado; b) SP-8-16, na profundidade de 1.526m, apresentando os detalhes de cristais de kaersutita e c) peridotito milonítico não serpentizado, Ilha Belmonte, Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Hb - hornblenda; Ol - olivina; Sp - espinélio e Cpx - clinopiroxênio.

Figure 8 - Photomicrography of mylonitic peridotite of brittle-ductile deformation (Angel-Amaya, 2010; Campos *et al.*, 2003): a) SP-10-18, collected from the depth of 1.351m, showing lamination texture of mylonitic peridotite; b) SP-8-16, from the depth of 1.526m, presenting the details of kaersutite crystal and c) non-serpentinized mylonitic peridotite, Belmonte Island, Saint Peter and Saint Paul Rocks. Hb - hornblende; Ol - olivine; Sp - spinel and Cpx - clinopyroxene.

A milonitização obliterou as feições primárias e, posteriormente, a serpentização por ações de fluidos hidrotermais e/ou de água de mar durante os movimentos tectônicos de caráter rúptil modificou ainda mais essas rochas (Campos *et al.*, 2003; 2005). A presença de kaersutita e o enriquecimento dos elementos de terras raras leves sugerem que o manto foi infiltrado por fluidos alcalinos (Sichel *et al.*, 2008; Angel-Amaya, 2010).

## peridotitos não deformados

Os peridotitos não deformados são representados principalmente por harzburgitos e lherzolitos em menor

proporção (figs. 9a, 9b, 9c). Os minerais primários destas rochas consistem de olivina ± ortopiroxênio ± clinopiroxênio ± espinélio como fenocristais. Os processos de serpentização são geralmente intensos, com os minerais secundários variando entre 80% a 100%.

Fenocristais de clinopiroxênio ocorrem isolados na matriz, apresentando ligeira deformação plástica (fig. 9b), enquanto os agregados microcristalinos de 2mm indicam infiltração tardia de fluido. A textura granoblástica com rede de veios, geralmente preenchidos por carbonatos, serpentina e magnetita, também sugerem a circulação de fluidos (fig. 10). As diferentes gerações de veios indicam que a serpentização não ocorreu em um único evento. A maioria da serpentina formou-se em condições

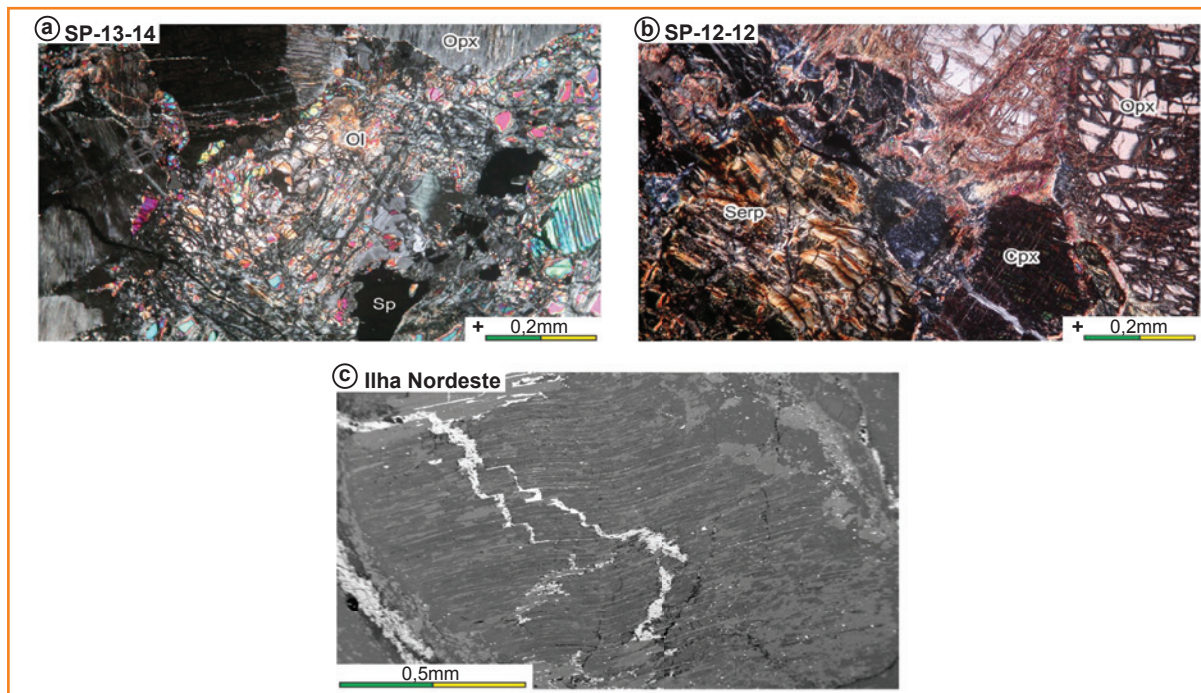


Figura 9 - Fotomicrografias de peridotitos não deformados: a) harzburgite com ortopiroxênio, espinélio, olivina e serpentina; b) Iherzolite serpentinizado com ortopiroxênio e clinopiroxênio e c) imagem de microscópio eletrônico de varredura para porfiroclasto de ortopiroxênio de uma amostra da Ilha Nordeste. Opx - ortopiroxênio; Cpx - clinopiroxênio; Ol - Olivina; Sp - espinélio e Serp - serpentina.

Figure 9 - Photomicrography of non-deformed peridotite: a) harzburgite with orthopyroxene, spinel, olivine, and serpentine; b) serpentinized Iherzolite with orthopyroxene, and clinopyroxene and c) SEM image for the orthopyroxene porphyroblast of a sample of the Nordeste Island. Opx - orthopyroxene; Cpx - clinopyroxene; Ol - olivine; Sp - spinel and Serp - serpentine.

**Figura 10**

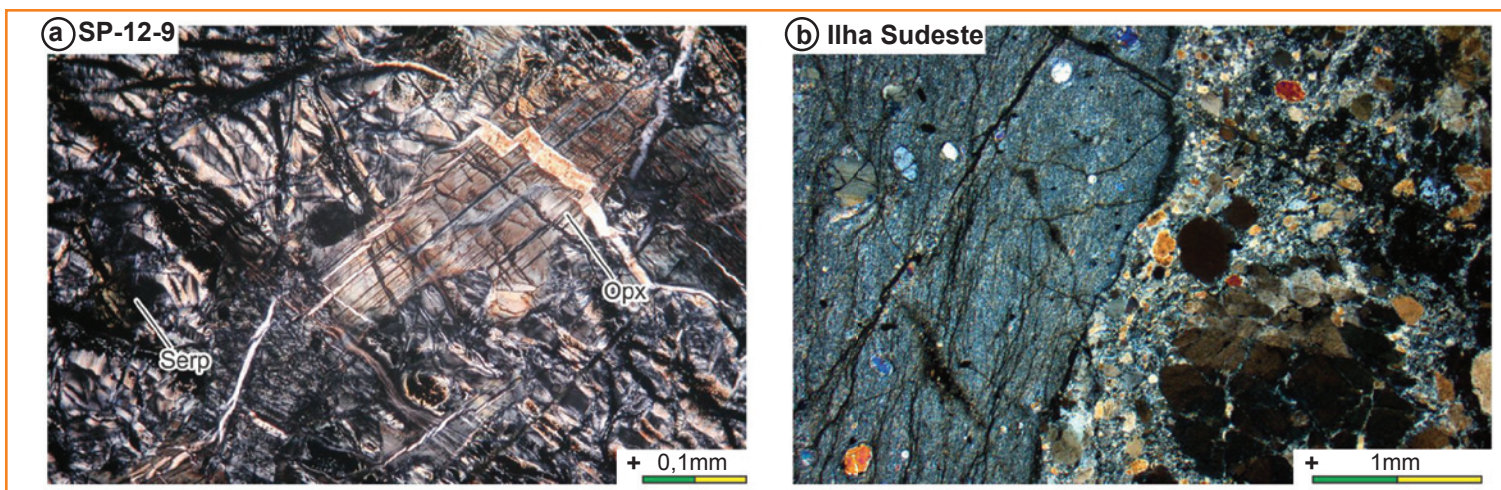
Textura característica dos peridotitos serpentinizados: a) amostra de um mergulho profundo coletada a 1.523m de profundidade, com fenocristais de ortopiroxênio (Opx) e serpentina (Serp) e b) peridotito milonítico da Ilha Challenger, ou seja, Ilha Sudeste (lado esquerdo da imagem) com o nível rico em kaersutita (lado direito).

**Figure 10**

Characteristic texture of serpentinized peridotite: a) sample of a deep dive collected from the depth of 1.523m, with orthopyroxene (Opx) and serpentine (Serp) crystals and b) mylonitic peridotite of the Challenger Island, that is, the Sudeste Island (left side of the photo) with a level rich in kaersutite (right side).

rúpteis, pela reação das rochas ultramáficas com o fluido ou água do mar que percolaram as fraturas. Estas características corroboram uma origem não diapírica para o maciço peridotítico de São Pedro e São Paulo (Angel-Amaya, 2010; Campos et al., 2003). Além dos peridotitos deformados e não deformados,

as rochas submersas do maciço peridotítico incluem, em menor quantidade, basaltos, metabasaltos, doleritos, brechas, e gabros (Hekinian et al., 2000). Na Ilha Sudeste aflora peridotito milonítico intercalado com níveis milimétricos a centimétricos de kaersutita (anfíbólio secundário) (fig. 10b).





# geoquímica

## geoquímica das rochas coletadas pelos mergulhos profundos

### elementos maiores, menores e traços

As rochas ultramáficas e máficas submersas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo foram analisadas para elementos principais, menores, traços e isótopos. A figura 11 apresenta os diagramas de variação dos elementos maiores *versus* MgO.

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo é peculiar por representar um manto enriquecido em elementos de terra raras leves e voláteis (fig. 12). Este enriquecimento é explicado por metassomatismo mantélico, que também foi responsável pela formação de anfibólio kaersutítico.

Os teores de elementos traços demonstram que os peridotitos não deformados são intensamente serpentinizados e contêm pelo menos 11% em peso de materiais voláteis. Tanto os peridotitos deformados da elevação norte como os não deformados da elevação sul (fig. 4) apresentam enriquecimento em elementos incompatíveis, tais como U, Th, Ba.

O enriquecimento nestes elementos pode estar relacionado ao processo de metassomatismo do manto,

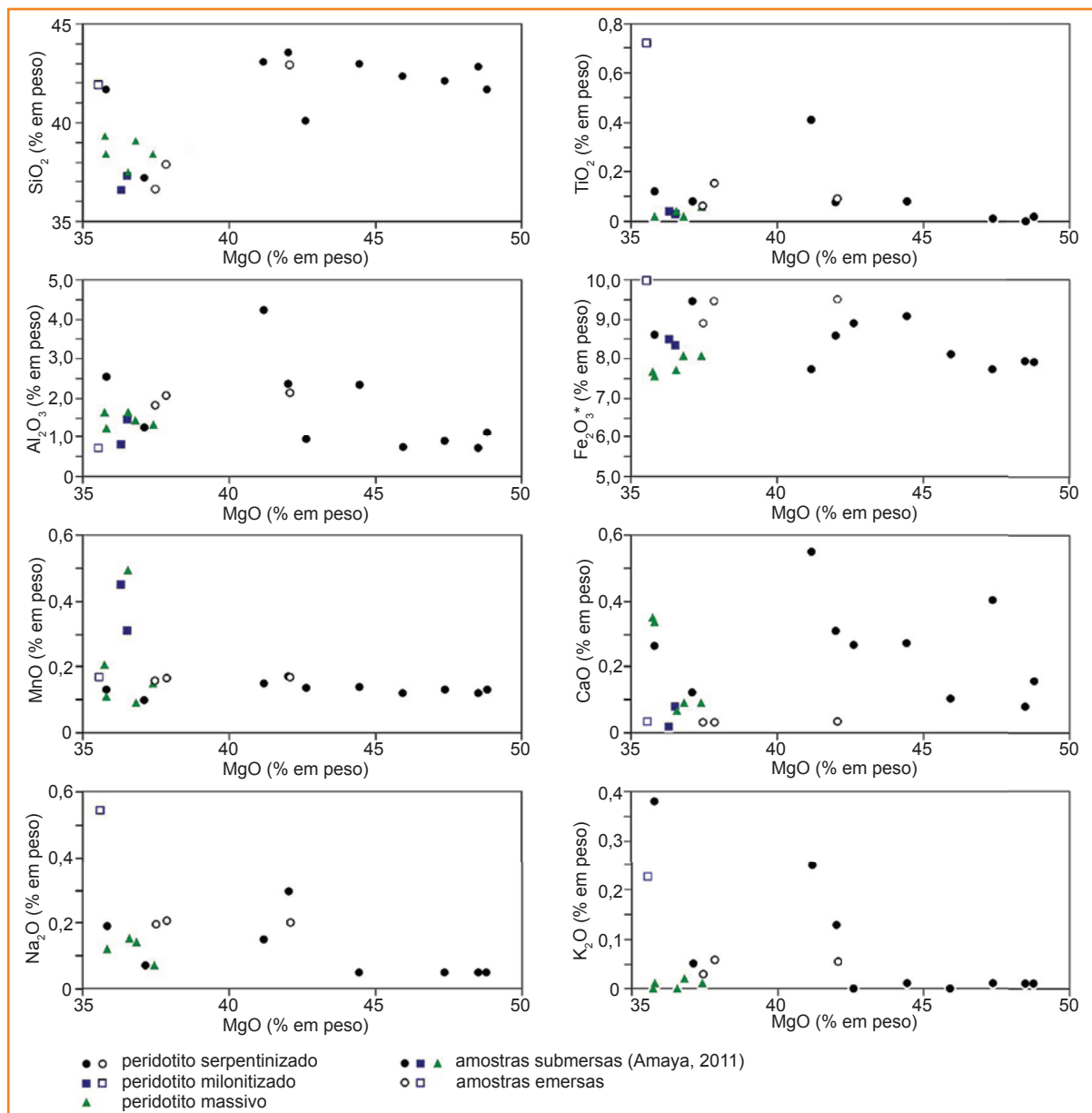


Figura 11

Diagramas de variação com base no MgO (% em peso) para os elementos principais das rochas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo.  $Fe_2O_3^*$  é o ferro total recalculado como  $Fe_2O_3$ . Os dados para as rochas submersas são de Angel-Amaya (2011) e as emersas nas ilhas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Figure 11

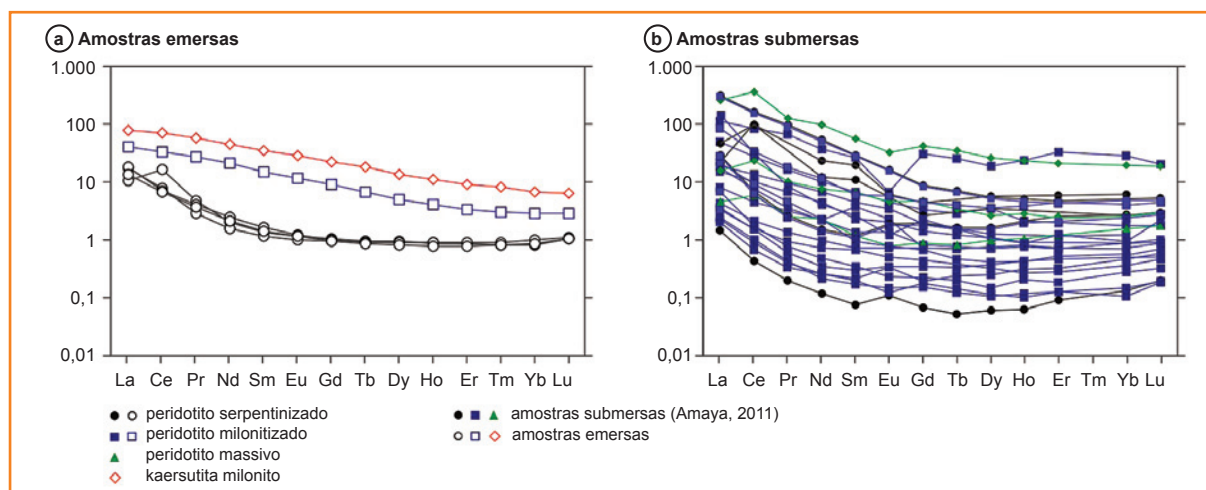
Variation diagram based on MgO (wt %) for main elements of the rocks of Saint Peter and Saint Paulo Peridotite Ridge.  $Fe_2O_3^*$  is total iron recalculated as  $Fe_2O_3$ . The data of the submarine samples are from Angel-Amaya (2011) and those exposed at the islands of Saint Peter and Saint Paul Rocks.

Figura 12

Diagrama de Elementos Terras Raras para os peridotitos de: a) Arquipélago de São Pedro e São Paulo e b) Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Angel-Amaya (2011).

Figure 12

Rare Earth Element diagram for the peridotites of: a) Saint Peter and Saint Paul Rocks and b) Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, Angel-Amaya (2011).



gerando um reservatório que inclui os elementos paternos, com U, Th e os isótopos descendentes He e NE (Angel-Amaya e Sichel, 2009; Angel-Amaya, 2010; Angel-Amaya *et al.*, 2010).

### geoquímica isotópica

A razão isotópica de Os dos peridotitos da zona de falhas transformantes de São Paulo aponta a presença de materiais originados de manto depletado quimicamente, com idades modelo de 0,32 Ga a 1,1 Ga. A variação nos teores de Re, Os e Pt sugere que o manto foi metassomatizado por fluidos gerados de uma zona de subducção pretérita (Sichel *et al.*, 2008). Inclusões de composição boninitica nos cristais de plagioclásio dos basaltos da cadeia meso-oceânica da região equatorial (cerca de 2°S) podem indicar uma refusão de manto depletado ou uma crosta oceânica reciclada (Sichel, 1990).

O método dos isótopos de gases nobres, principalmente de hélio, foi desenvolvido para obter informações sobre a origem e a evolução do manto, isto é, influência de plumas do manto inferior, mistura de fontes magmáticas, contaminação atmosférica e produção de isótopos cosmogênicos. Com o objetivo de estimar o conteúdo de gases nobres do manto na área equatorial, peridotitos e frações minerais (serpentina e olivina+piroxênio) da Cadeia de São Pedro e São Paulo foram analisados. Ao contrário do esperado, estas rochas, apesar de serpentinizadas e deformadas, possuem altas concentrações de gases nobres, retendo uma assinatura mantélica. (Angel-Amaya *et al.*, 2010). Esses dados suportam a relação entre deformação e concentração dos gases raros reportada previamente por Kurz *et al.* (2009), na qual os milonitos recristalizados com menor granulometria

liberaram o maior conteúdo de hélio ( $1,4 \times 10^{-5}$  e  $1,2 \times 10^{-5}$  ccSTP/g). Para o grupo dos peridotitos não deformados, os concentrados de olivina+piroxênio liberaram de maneira variada menor quantidade de hélio, entretanto, a fração de serpentina liberou o menor valor ( $9,2 \times 10^{-8}$  ccSTP/g (fig. 13). Esses resultados mostram que a serpentina, em comparação aos outros materiais analisados, retém pequenas quantidades de hélio, corroborando com Kurz *et al.* (2009). Os dados isotópicos de hélio mostram que as rochas contêm uma mistura de hélio mantélico ( $^3\text{He}/^4\text{He} = 6-9 \text{ Ra}$ ), hélio atmosférico ( $^3\text{He}/^4\text{He} = 1 \text{ Ra}$ ) e hélio radiogênico ( $^3\text{He}/^4\text{He} \sim 0,01 \text{ Ra}$ ). A assinatura radiogênica de hélio pode refletir contaminação através da interação com a crosta oceânica (sedimentos jovens e água do mar) ou produção radiogênica de  $^4\text{He}$  *in situ* (Hilton *et al.*, 1995).

Conclusões preliminares apontam que a crosta oceânica inferior reciclada e o manto superior podem ser contribuintes significativos ao conteúdo de gases nobres da litosfera. No caso dos peridotitos de São Pedro e São Paulo, o enriquecimento principalmente de hélio e a sua assinatura isotópica binária (componentes mantélico e atmosférico) representam os processos de:

- milonitização de um manto previamente afetado por metassomatismo, principalmente na elevação norte, no limite com a falha transformante de São Paulo (fig. 4);
- serpentização das rochas não milonitizadas da elevação sul (fig. 4) que foram fraturadas, introduzindo elementos incompatíveis e radiogênicos como Rb e U durante a infiltração da água do mar.

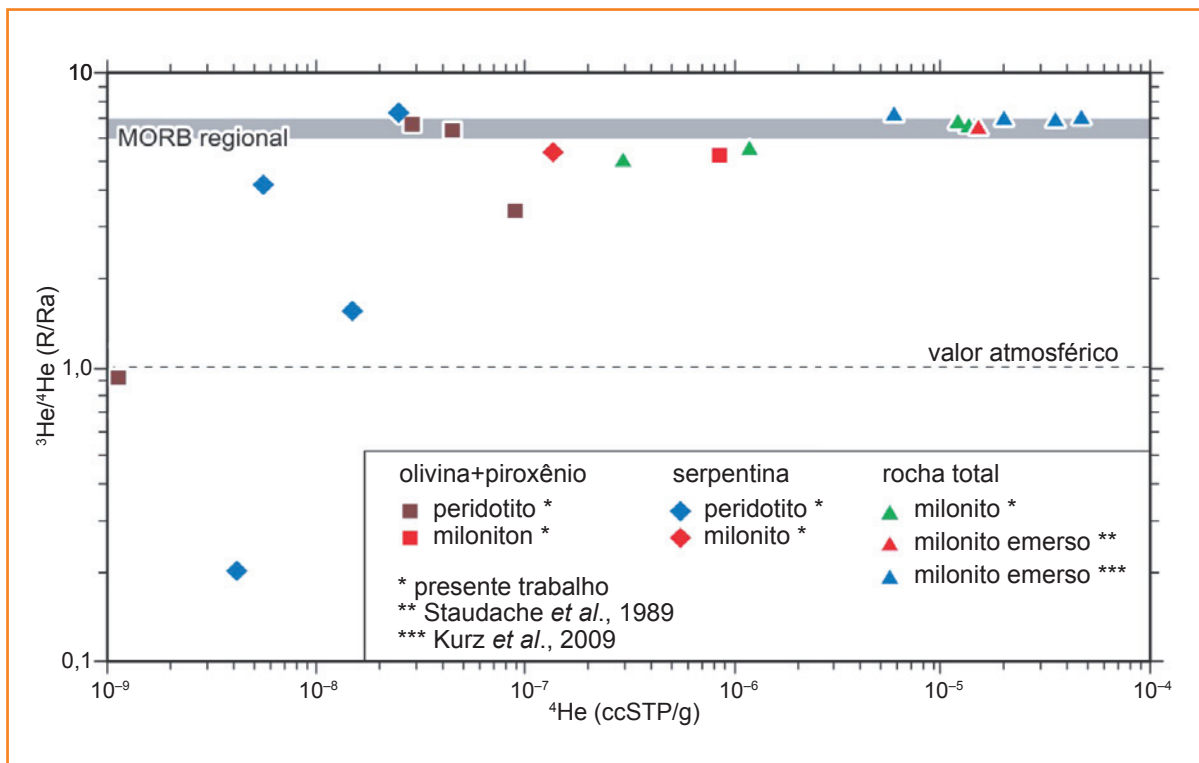


Figura 13 - Concentrações e frações isotópicas de He para as rochas mantélicas, peridotitos e milonitos submersos da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo coletados durante seis mergulhos profundos, através do submersível Nautilo (Quadrado marrom, Diamante azul e Triângulo verde; Angel-Amaya, 2011) e para milonitos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Triângulo azul; Kurz et al., 2009; Triângulo vermelho; Staudacher et al., 1989). O valor do MORB regional foi extraído de Graham et al. (1992).

Figure 13 - Concentrations and isotopic fraction of He for the peridotites and mylonites of Saint Peter and Saint Paul Massive collect during six deep dives with the Nautilo submersible (brown Square, blue Diamond and green Triangle; Angel-Amaya, 2011) and for the milonites from the Archipelago Saint Peter and Saint Paul (blue Triangle; Kurz et al., 2009; red Triangle; Staudacher et al., 1989). The value of the regional MORB was extract from Graham et al. (1992).

## geoquímica das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Nas rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, observa-se que alguns processos geológicos alteraram o seu caráter geoquímico primário, sugerindo a seguinte sequência de eventos:

- a milonitização alterou a textura e a granulometria dos minerais constituintes, mas não afetou acentuadamente a composição geoquímica original. Entretanto, o padrão de distribuição dos elementos de terras raras normalizadas para condrito indica enriquecimento em terras raras leves em relação às pesadas e anomalia positiva Ce (fig. 12). Os

elementos do grupo da platina (EGP) apresentam um padrão plano e se encontram empobrecidos em relação ao condrito (Campos et al., 2003);

- a serpentinização e halmirólise (processo associado à ação de fluidos hidrotermais e/ou água do mar) provocaram uma ampla variação nos teores de MgO (36-49%) e nos de TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O, e K<sub>2</sub>O. Estes últimos variaram inversamente com o aumento de MgO. Os teores de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MnO mantiveram-se relativamente constantes. Os elementos de terras raras leves do milonito peridotítico serpentinizado mostraram uma maior variação comparada ao milonito peridotítico não serpentinizado, não

apresentando anomalia de Ce (fig. 12). Esse fato deve-se à mobilidade diferencial do Ce durante a serpentinização e halmirólise, processos esses que parecem não ter afetado significativamente os outros EGP;

**Figura 14**  
Mapa de seppômen das ilhas Belmonte, Challenger (Sudeste) e Nordeste com base na malha de 10m (modificado de Motoki et al., 2009).

**Figure 14**  
Summit level map for the Belmonte, Challenger (Sudeste), and Nordeste Island base on the mesh of 10m (modified from Motoki et al., 2009).

- a ornitogênese no intemperismo: o processo da ornitogênese está relacionado à interação entre a água do mar e o guano nitrogenado originado de atividades de aves marinhas nas rochas. A lixiviação da crosta rica em fósforo conduz à formação de fosforita epigenética. Os depósitos contêm elevada concentração de fósforo, principalmente apatita, a qual fica protegida dentro de uma rede de microfaturas (Smith, et al., 2012). Processos similares são observados em outras ilhas oceânicas tropicais (Melfi e Flicoteaux, 2000; Oliveira et al., 2010).

## tectonismo ativo

O relevo submarino em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo é altamente acidentado, cujos flancos possuem declividade média em torno de 50°. Na elevação sul, ocorre uma escarpa subvertical de 1.500m de altura e um graben paralelo à escarpa, ou seja, com direção leste-oeste (fig. 4). Em adição, ocorrem várias escarpas verticais com altura superior a 100m. O relevo é instável, sendo formado pelo intenso tectonismo ativo, que produz localmente depósitos de tálus realçados pelos fragmentos de peridotitos observados em imagens obtidas através do submersível, sugerindo uma formação recente.

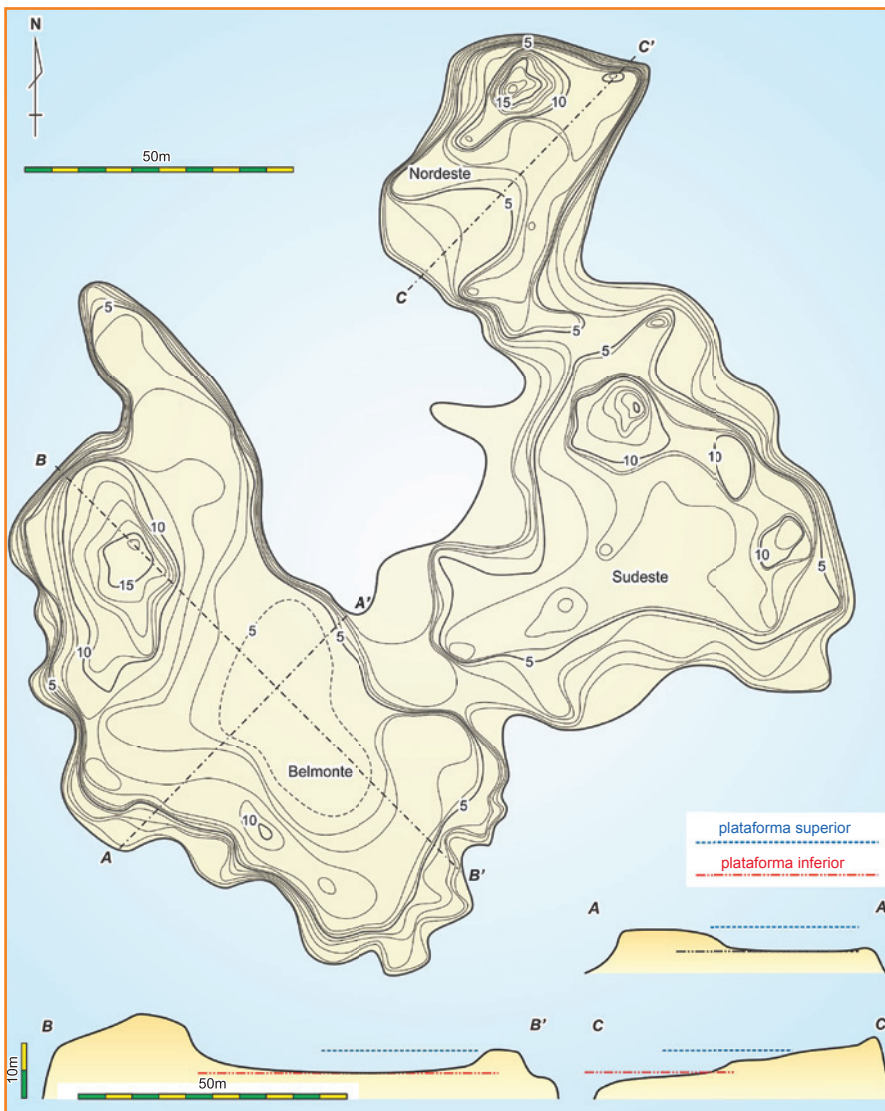
## plataforma de abrasão marinha

Os rochedos que compõem o Arquipélago de São Pedro e São Paulo ocupam uma área de 400m x 200m. Ocorrem patamares de 5m a 9m de altitude, que são atribuídos à plataforma de abrasão marinha (fig. 1).

O uso da técnica de *seppômen* com base na malha de 10m de intervalo que reproduz a paleomorfologia antes da erosão recente (Motoki et al., 2008; 2012a; Silva, 2010; Couto et al., 2012; Aires et al., 2012) evidencia a existência de duas plataformas de abrasão marinha quando aplicada no ASPSP, uma de 4m a 5m e a outra de 7m a 9m de altitude (figs. 14 e 15). O último evento de transgressão marinha ocorreu há cerca de seis mil anos – Transgressão Flandriana – (Shackelton, 1987) e nas regiões continentais o nível do mar era cerca de 5m mais alto que o atual. Contudo, Fleming et al. (1998) defendem a inexistência de uma regressão absoluta pós-flandriana. Salienta-se que a plataforma inferior existente no ASPSP (fig. 14) se encontra em um processo ativo de abrasão marinha. Considerando que a plataforma superior do ASPSP possui uma idade flandriana, a taxa de soerguimento tectônico relativo ao nível do mar nos últimos seis mil anos foi estimada pelo método *seppômen* em 1,5mm/ano (Motoki et al. 2009).

## datações <sup>14</sup>C em fósseis calcárias

As datações pelo método <sup>14</sup>C para fósseis de algas calcárias melobésicas da Ilha Belmonte apresentam a relação entre idades e altitudes, o que sugere uma



taxa de soerguimento relativo ao nível do mar de cerca de 1,5mm/ano nos últimos 6.600 anos (Campos *et al.*, 2010). Salienta-se que na plataforma superior de abrasão marinha (fig. 16) foi encontrado o fóssil melobésico com idade  $^{14}\text{C}$  em torno de 6.000 anos. Esta taxa de soerguimento obtida por Campos *et al.* (2010) é idêntica à estimada pelo método do *seppômen*, com base na plataforma superior de abrasão marinha utilizada por Motoki *et al.* (2009).

## fraturas tectônicas de compressão

No Arquipélago de São Pedro e São Paulo, ocorre um sistema de diaclasamento que corta discordantemente a estrutura milonítica. Isto é, as

rochas ultramáficas do ASPSP sofreram uma deformação plástica que originou a estrutura milonítica e, posteriormente, foram submetidas a um evento de deformação rúptil que gerou o diaclasamento. As diáclases observadas são: a) de origem tectônica, apresentando-se subverticais; b) de alívio de sobrecarga, apresentando-se com baixo ângulo e subparalelas à superfície e c) de expansão volumétrica por serpentinização, com direções aleatórias e/ou acompanhando as do diaclasamento.

Na figura 17, apresentam-se as projeções das 5.438 diáclases medidas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. As áreas  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$  mostram concentração dos pólos de fraturas de alto ângulo de origem tectônica e C, as fraturas de baixo ângulo de alívio de sobrecarga. As médias de direção

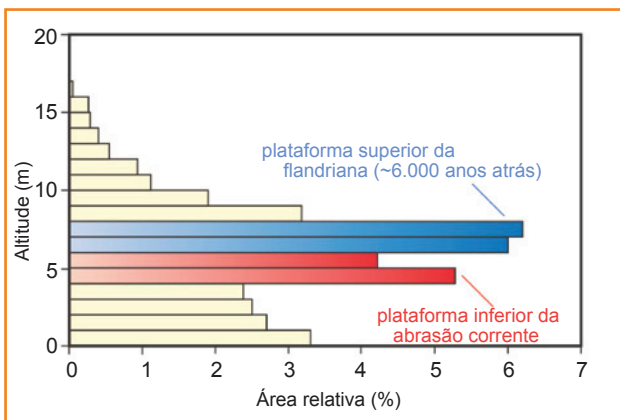


Figura 15 - Histograma de distribuição altimétrica dos níveis da superfície de seppômen das ilhas Belmonte, Challenger e Nordeste, com base na malha de intervalo de 5m, segundo Motoki *et al.* (2009b). As áreas foram calculadas pela contagem de pixels conforme o método de Motoki *et al.* (2007; 2012b), utilizando-se software original Wilbur versão 1.0 (Motoki *et al.*, 2006). Na plataforma superior, foram encontradas algas calcárias com a idade  $^{14}\text{C}$  de 6.600 anos.

Figure 15 - Altimetric distribution histogram for the summit level surface of the Belmonte Island, Challenger Island, and Nordeste Island, based on the mesh interval of 5m, after Motoki *et al.* (2009b). The areas were calculated by pixel counting according to the method of Motoki *et al.* (2007; 2012b) using the original software Wilbur version 1.0 (Motoki *et al.*, 2006). On the upper platform, the calcium algae of 6.600 years in  $^{14}\text{C}$  age was collected.

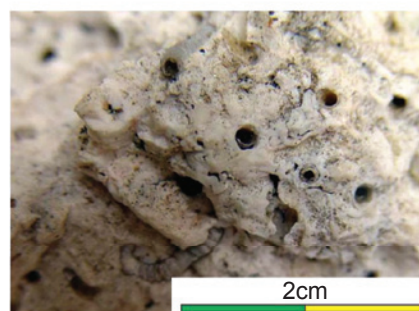
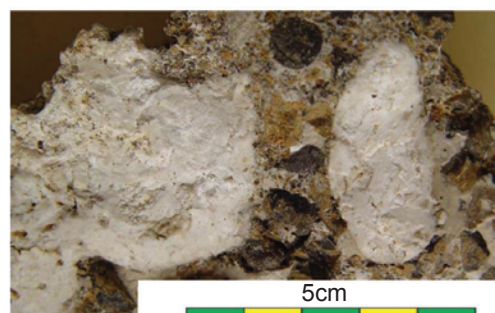
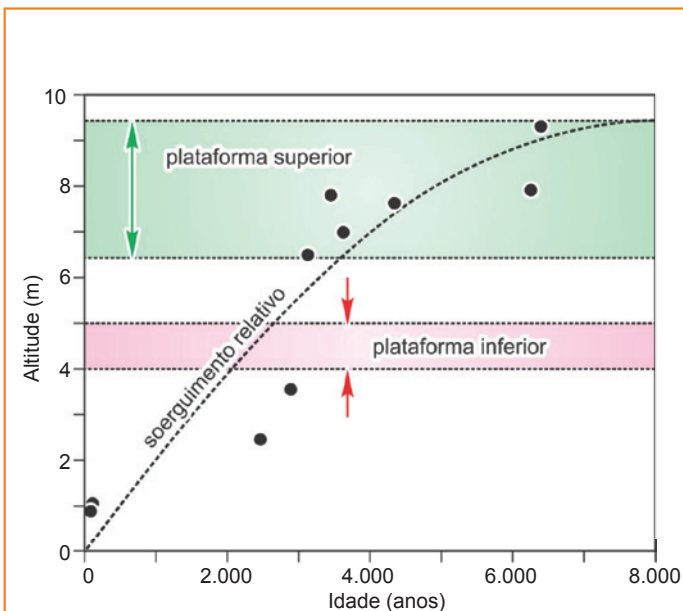


Figura 16

Correlação entre idades  $^{14}\text{C}$  para as algas calcárias e as alturas de ocorrência (Campos *et al.*, 2010).

Figure 16

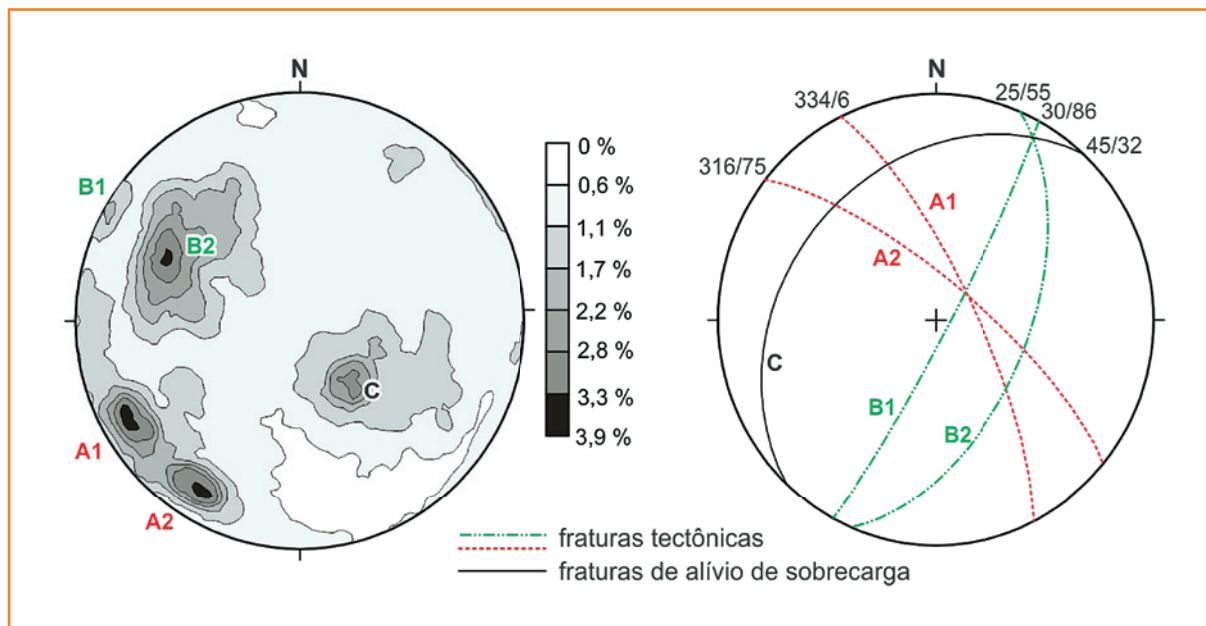
Correlation between  $^{14}\text{C}$  ages for the calcium algae and occurrence altitudes (Campos *et al.*, 2010).

Figura 17

Projeção estereográfica para 5.438 fraturas medidas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Campos et al., 2004).

Figure 17

Stereographic projection for 5.438 measured fractures at Saint Peter Saint Paulo Rock (Campos et al., 2004).



e mergulho para A1 são 334/76 e para B1 30/86, respectivamente. Estas se cruzam a  $64^\circ$ , formando um sistema de fraturas conjugadas com o eixo de compressão N3W. Aquelas na área de concentração  $A_2$  (316/75) e na área de concentração B2 (25/55) se cruzam a  $69^\circ$ , constituindo fraturas conjugadas com o eixo de compressão N10W. Ambos os sistemas conjugados indicam a existência de um esforço compressional com direção aproximada norte-sul. São observados efeitos de deslizamento gravitacional em todo o arquipélago, especialmente nas fissuras da Ilha Cabral (fig. 18).

## mecanismo focal dos terremotos

A formação das fraturas tectônicas no ASPSP ocorreu após um evento de deformação plástica da estrutura milonítica. Consequentemente, correspondendo a um evento geológico recente. Dessa forma, a compressão norte-sul pode estar relacionada ao tectonismo de soerguimento ativo. Os esforços tectônicos de compressão ainda estão ativos, sendo manifestados nos atuais mecanismos focais de terremoto.

Entre 1971-1988 ocorreram 15 terremotos (Wolfe et al., 1993; fig. 19). Entre eles, 12 terremotos são de

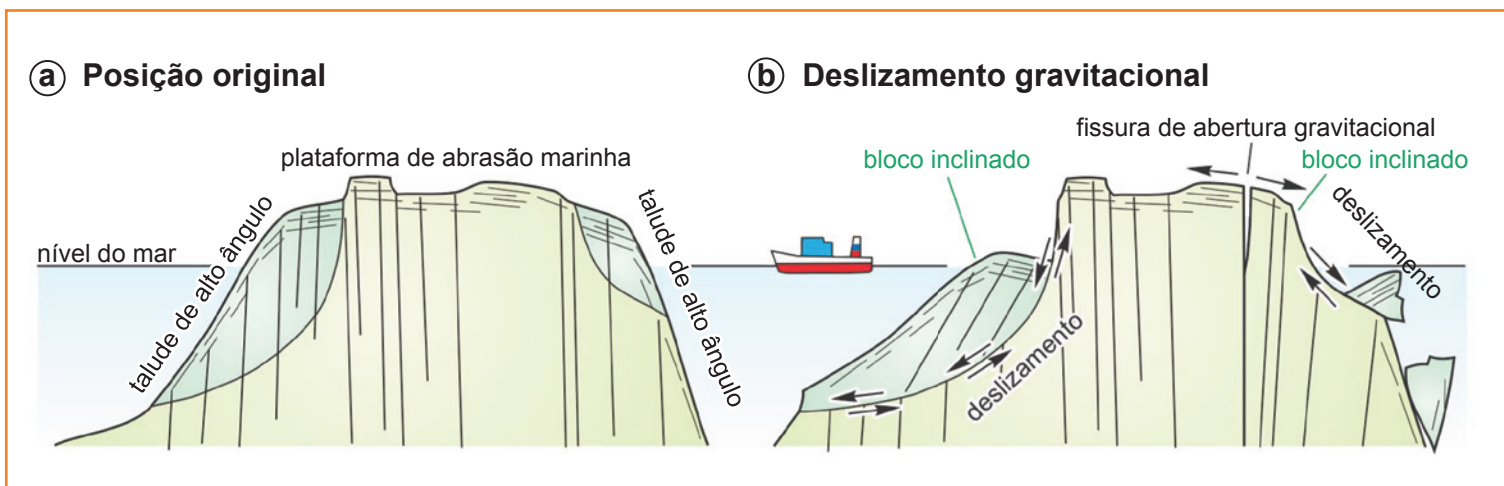


Figura 18 - Perfil esquemático para o deslizamento gravitacional de rochas e a fissura de abertura gravitacional na zona da superfície do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. A escala vertical é exagerada.

Figure 18 - Schematic cross-section for the gravitational rock-slide and pull-apart fissure on the surface zone of the Saint Peter and Saint Paul Rocks. The vertical scale of the figures is exaggerated.

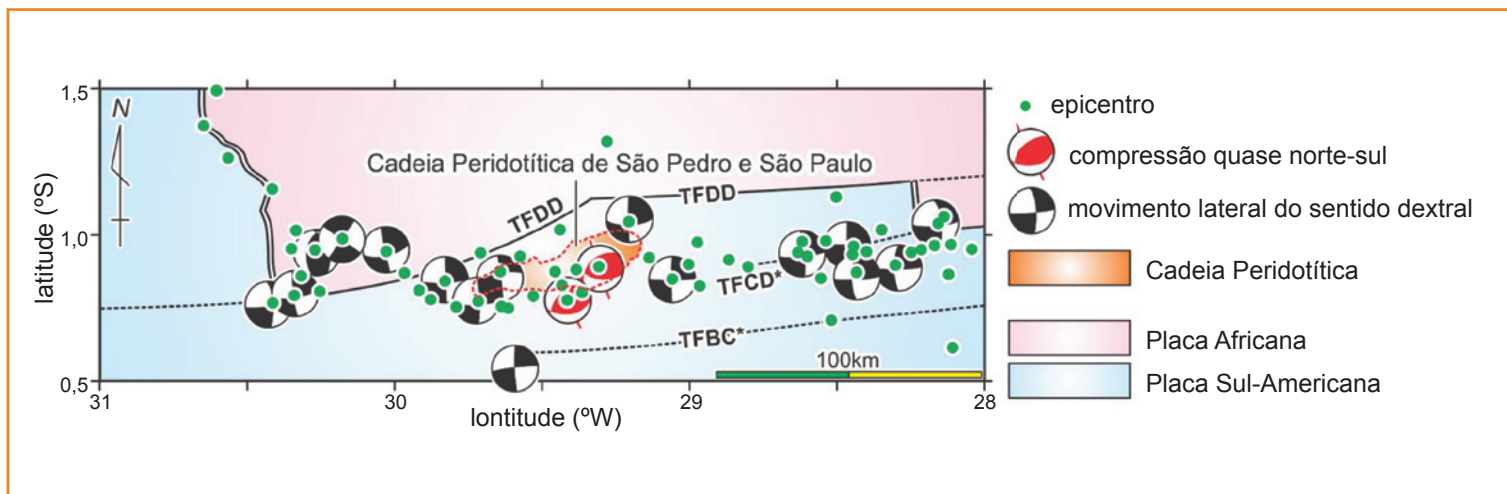


Figura 19 - Epicentros e mecanismos focais dos terremotos que ocorreram entre 1971 e 1988, conforme os dados de Wolfe et al. (1993). O contato entre a Placa Sul-Americana e a Placa Africana está de acordo com a nova interpretação do presente trabalho.

Figure 19 - Epicenters and focal mechanisms of the earthquake that occurred during the period from 1971 to 1988, after the data of Wolfe et al. (1993). The contact between the South America Plate and Africa Plate is according to the new interpretation of the present article.

deslocamento transcorrente dextral leste-oeste, que correspondem ao movimento do sistema de falhas transformantes de São Paulo. Um terremoto próximo à cadeia meso-oceânica possui mecanismo focal de distensão leste-oeste, representando a expansão do fundo do oceano. Os dois terremotos que ocorreram na proximidade da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo demonstram compressão norte-sul com ligeira tendência a noroeste-sudeste. Os mecanismos focais do último grupo sugerem, que a compressão norte-sul se manifesta nas fraturas tectônicas ainda no presente. Contudo, o esforço da compressão norte-sul, é aqui interpretado como sendo a força motriz do soerguimento ativo, e esse tectonismo gerou o Maciço de São Pedro e São Paulo durante os últimos milhões de anos.

## estrutura milonítica

As rochas ultramáficas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo apresentam estrutura milonítica originada de tectonismo rúptil-dúctil (fig. 8). O mergulho desta é de alto ângulo, 50° a 70°, e as direções são variáveis, de NE-SW para NNW-SSE (fig. 20a). A estrutura milonítica pode ser atribuída à deformação plástica que ocorreu na falha transformante.

Porém, a direção atual dessa estrutura (NE-SW) não é paralela às falhas transformantes desta região, que são de direção geral E-W (Simões, et al., 2009; fig. 2). O evento de deformação plástica foi anterior à compressão norte-sul. Este fato indica a possível ocorrência do evento de deformação compressional na Cadeia de São Pedro e São Paulo, após a formação da foliação milonítica. Os autores apresentam a seguinte hipótese de trabalho para explicar o evento de deformação acima citado.

O Sistema de Falhas Transformantes de São Paulo possui cinco segmentos intratransformantes (TFAA, TFAB, TFBC, TFCD e TFDD; fig. 2). A distância entre o arquipélago e o Segmento C é de 180km e a taxa de expansão da cadeia meso-oceânica é de 1,5cm/ano para cada lado, indicando que um deslocamento transcorrente dextral ao longo do TFCD aconteceu pelo menos durante 12 Ma. As estruturas anteriores foram redirecionadas paralelamente à falha transformante (fig. 20b).

Após a formação da foliação paralela ao movimento transcorrente (E-W), ocorreu uma brusca mudança no movimento da falha transformante e das placas oceânicas. Essa mudança teria sido provocada pela desaceleração ou paralisação do deslocamento dextral, que poderia causar a perturbação da estrutura milonítica ou foliação. Uma possível causa para uma mudança brusca é o surgimento de um novo segmento intratransformante. Quando acontece

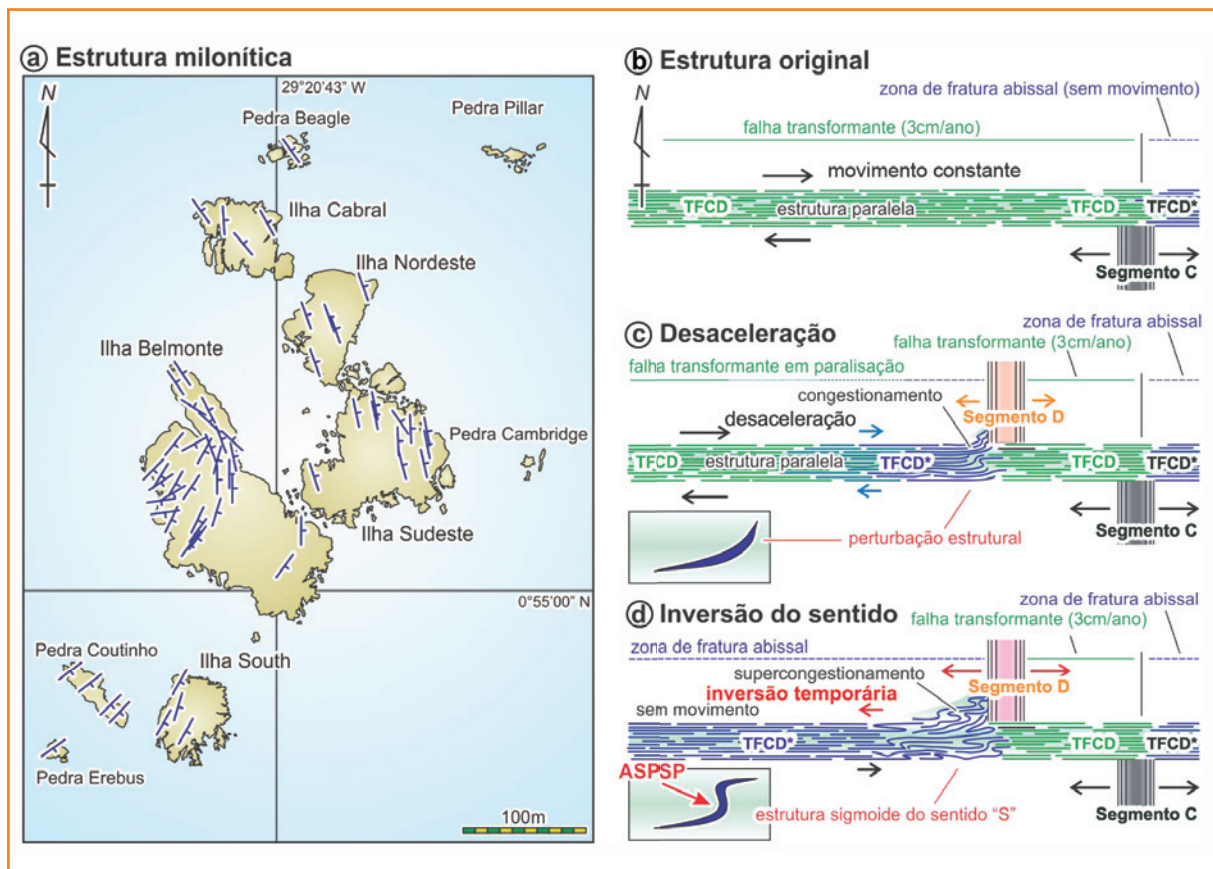


Figura 20 - Estrutura milonítica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Simões et al., 2009) e sua interpretação: a) medida no campo; b) movimento transcorrente constante da falha transformante e a estrutura original paralela; c) desaceleração abrupta de movimento da falha e consequente perturbação estrutural por congestionamento e d) inversão temporária do sentido de movimento da falha e o consequente supercongestionamento, formando a estrutura sigmoideal.

Figure 20 - Mylonite structure of Saint Peter and Saint Paul Rocks (Simões et al., 2009) and its interpretation: a) field data; b) constant strike-slip movement of the transform fault and original parallel structure; c) sudden decrease of fault movement and consequent structural perturbation by congestion and d) temporary inversion of fault movement sense and consequent supercongestion, forming S-shaped structure.

a desaceleração do movimento, a perturbação da foliação ocorre em primeiro lugar no contato entre a falha transformante e o novo segmento intra-transformante da cadeia meso-oceânica, devido ao congestionamento causado pela expansão do segmento recém-formado (fig. 20c). Em casos extremos, poderia ocorrer a inversão temporária no sentido do movimento transformante da falha, o que possibilita a geração da estrutura milonítica de forma sigmoideal (fig. 20d).

As estruturas miloníticas medidas no campo (fig. 20a) são incompatíveis com o modelo da figura 20b. Entretanto, são compatíveis com os modelos da figura 20c e 20d. Esse modelo sugere o surgimento do novo segmento da cadeia meso-oceânica, no caso da figura 20, o Segmento D.

## exposição do manto abissal

A existência de rochas mantélicas, peridotitos serpentinizados, foi reconhecida na década de 1970 em alguns sítios ao longo de falhas transformantes e zonas de fratura abissal, através de amostras obtidas nas dragagens.

A exposição do manto abissal, ou seja, ausência da crosta oceânica ocorre em duas condições: 1) manto de baixa temperatura e 2) expansão lenta da dorsal oceânica.

Falhas transformantes e zonas de fraturas abissais são feições caracterizadas pela baixa temperatura mantélica. As exposições do manto no Oceano Atlântico podem ser atribuídas à baixa taxa de expansão da cadeia meso-oceânica. Essas condições



são desfavoráveis para fusão parcial do manto. O magma gerado através da baixa fusão parcial terá caráter alcalino.

O manto abissal aflorante no Arquipélago de São Pedro e São Paulo é diferente dos casos gerais acima citados, por ser uma grande cadeia peridotítica com altura relativa superior 3.800m (fig. 3), sendo um raro exemplo de ocorrência desse tipo.

## modelo de megamullion

No final do século XX e início do XXI, foram observadas rochas mantélicas em certas áreas na proximidade à cadeia meso-oceânica, formando faixas de saliência morfológica semelhantes à carapaça de tartaruga, denominados *megamullions* ou *Mantle Core Complex (MCC)*, situados perpendicularmente à dorsal meso-oceânica e paralelamente à falha transformante, com altura média de 500m a 1.000m (Blackman *et al.*, 1998; Tucholke *et al.*, 1998; 2001 e Ohara *et al.*, 2001). Na superfície dessas feições, existem pequenas elevações e depressões lineares com o intervalo de 500m a 1.000m e altura relativa em torno de 100m chamadas de corrugação (fig. 21), formando degraus na superfície do *megamullion*.

A exumação do manto ocorre quando o magma não é gerado durante a expansão das placas oceânicas, sendo denominada de expansão amagmática ou tectônica. As placas oceânicas em expansão são delimitadas por uma falha sub-horizontal, denominada falha de descolamento (fig. 22), onde o bloco

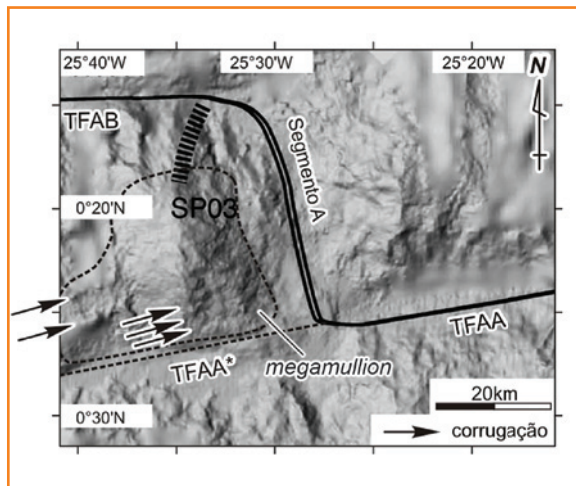


Figura 21 - Morfologia submarina indicativa de *megamullion* (a área cercada pela curva tracejada) no limite sudeste da Zona de Falha Transformante de São Paulo, apresentando corrugações (setas). A imagem da batimetria por multifeixes é originada de Brunelli e Seyler (2010). O SP03 é uma das trajetórias de mergulhos profundos de Hekinian *et al.* (2000). A área para este mapa batimétrico é indicada na figura 2b.

Figure 21 - Submarine morphology indicative of *megamullion* (the area closed by the dashed curve) at the south-east corner of the Saint Paul Transform Fault Zone, showing corrugations (arrows). The SP03 is one of the deep dive trajectories of Hekinian *et al.* (2000). The multi-beam bathymetry image is originated from Brunelli and Seyler (2010). The area for this bathymetric map is indicated on the figure 2b.

Figura 22

Ilustração esquemática para a gênese de *megamullion* e expansão amagmática de placas oceânicas através de falha de descolamento:

a) expansão convencional com magmatismos e formação de crosta oceânica; b) expansão tectônica sem magmatismo e c) alternância de peridotito abissal e gabro. A ilustração "c" é originada de Tucholke *et al.* (1998). A escala vertical de todas as figuras é exagerada em relação à escala horizontal.

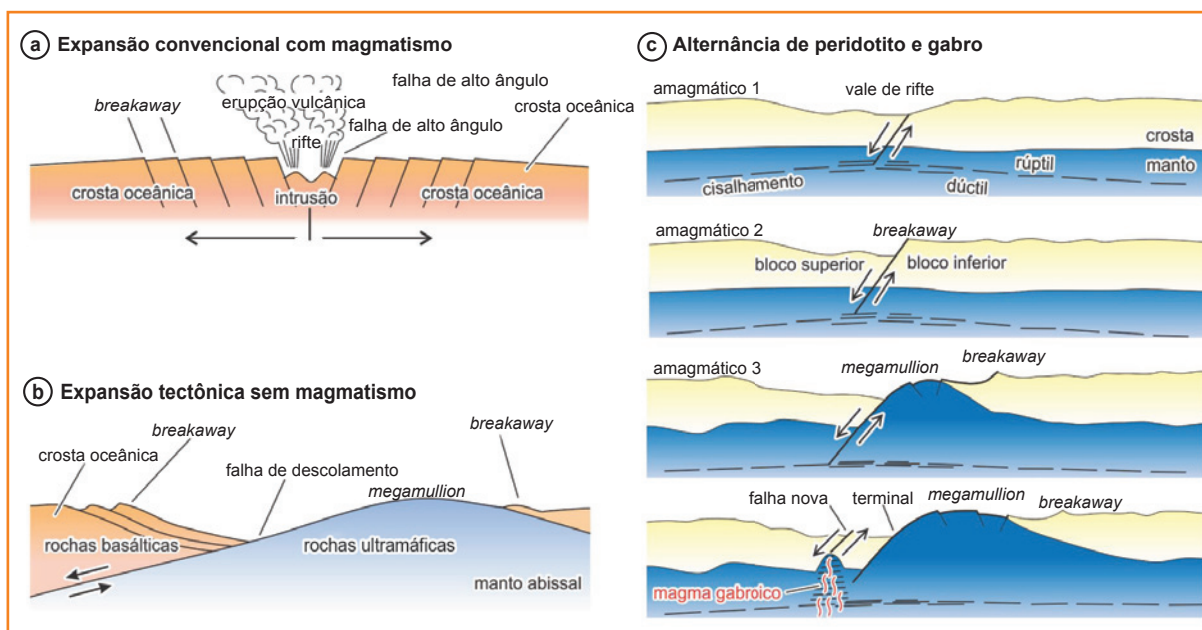


Figure 22

Schematic illustration for the genesis of *megamullion* and amagmatic spreading of oceanic plates by means of detachment fault: a) conventional spreading with magmatism and oceanic crust formation; b) tectonic spreading without magmatism and c) alternation of abyssal peridotite and gabbro. The illustration "c" is originated from Tucholke *et al.* (1998). The vertical scale of all the illustration is exaggerated in relation to the horizontal scale.

inferior desta falha é constituído por manto abissal e o bloco superior por basalto da crosta oceânica.

A expansão amagmática ocorre em duas condições: 1) quando a expansão da cadeia meso-oceânica é de baixa velocidade e 2) quando o manto subjacente é de baixa temperatura.

Para os *megamullions* do Atlântico Norte, o primeiro fator parece ser mais importante. Na proximidade do *Atlantis Megamullion* esta expansão é de 1,5cm/ano (Canales *et al.*, 2004, Anderson e Sclater, 1972; Herron, 1972). Devido à baixa taxa de expansão, a ascensão do manto é lenta e a sua fusão parcial é reduzida. Alguns *megamullions* são caracterizados por relativa abundância de gabro, além das rochas ultramáficas do manto abissal (Canales *et al.*, 2004; Tucholke *et al.*, 2008).

A taxa de expansão no Oceano Atlântico Equatorial é o dobro quando comparada ao Atlântico Norte, sendo em torno de 3,0cm/ano (Cande *et al.*, 1988; Carbotte *et al.*, 1991). Entretanto, ocorrem exumações do manto em certas localidades onde a temperatura do manto subjacente é anormalmente baixa (Bonatti *et al.*, 1993; Hekinian *et al.*, 2000; Gung e Romanowicz, 2004; Sichel *et al.*, 2008), denominadas *cold-spot* (Cann *et al.*, 1997; Ohara *et al.*, 2001; Whitmarsh *et al.*, 2001; Ritzwoller *et al.*, 2003; Canales *et al.*, 2004). A Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo é constituída predominantemente por rochas ultramáficas, havendo pequenas proporções

de gabro, dolerito e basalto. A taxa da fusão parcial é baixa e o magma basáltico tende a ser alcalino. Neste caso, a baixa temperatura do manto abissal parece ser o fator mais importante.

## a cadeia peridotítica é um *megamullion*?

Sendo constituída por rochas peridotíticas do manto abissal, a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo poderia ser um *megamullion*. Porém, este modelo não justifica sua altura de 3.800m, muito superior ao das reportadas para outros *megamullion* (1.000m a 2.000m).

A elevação norte da Cadeia de São Pedro e São Paulo é composta de peridotito milonítico (figs. 4 e 5). O relevo é caracterizado por escarpas de alto ângulo, sem a morfologia indicativa de corrugação. Pode-se concluir que a elevação norte não possui características morfológicas e petrográficas de *megamullion*, e sim indicativas da ação da falha transformante.

Entretanto, a elevação sul possui altura média de 1.500m. Os mergulhos profundos no submersível Nautila revelaram que as rochas são peridotitos não deformados (Hekinian *et al.*, 2000). A batimetria exhibe feições morfológicas de corrugação (Brunelli e Seyler, 2010; fig. 23). Portanto, a elevação sul possui características geológicas e morfológicas de *megamullion*

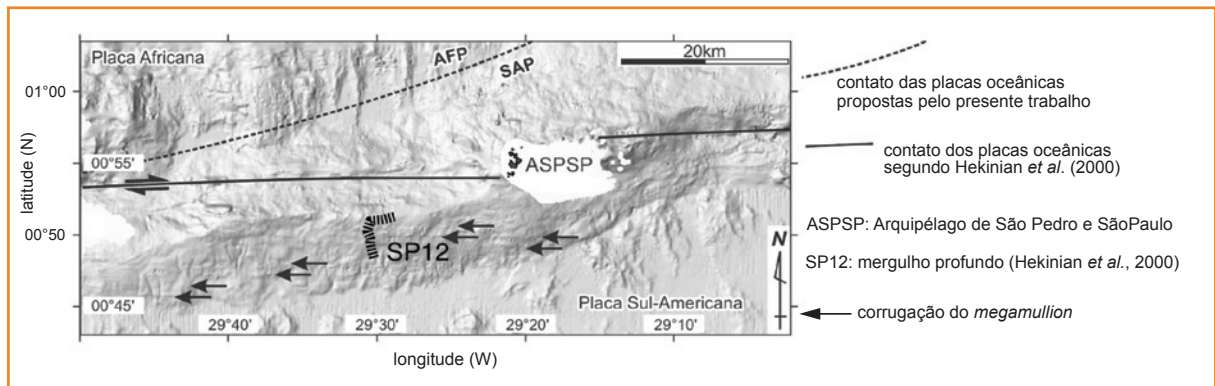


Figura 23 - Mapa de relevo da batimetria por multifeixes e sua interpretação geotectônica segundo Brunelli e Seyler (2010). A linha sólida aponta o graben cortando longitudinalmente a Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, que foi interpretado por Hekinian *et al.* (2000) como a falha transformante que delimita a Placa Sul-Americana e a Placa Africana. A curva tracejada indica o contato da placa proposto pelo presente artigo. Neste caso, a linha sólida corresponde a uma zona de fratura abissal, sem movimento relativo.

Figure 23 - Multi-beam bathymetry relief map and its geotectonic interpretation after Brunelli and Seyler (2010). The solid line points out the graben cutting longitudinally the Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, which was interpreted by Hekinian *et al.* (2000) as the transform fault between, that is, the boundary between South America Plate and Africa Plate. The dashed curve indicates the plate boundary proposed by this paper. In this case, the solid line corresponds to an abyssal fracture zone, without relative movement.

e sua altura é em função do soerguimento originado pela compressão norte-sul.

## evolução geotectônica

Trabalhos anteriores (Hekinian *et al.*, 2000; Brunelli e Seyler, 2010) interpretaram o graben leste-oeste que corta a Cadeia Peridotítica São Pedro e São Paulo como o contato entre a Placa Sul-Americana e a Placa Africana, sendo este uma falha transformante ativa (figs. 2 e 4). A forma sigmoidal da cadeia peridotítica seria a consequência do movimento transcorrente dextral da falha ativa. O Sistema Transformante de São Paulo seria constituído por três segmentos intratransformantes de cadeia meso-oceânica (segmentos a, b e c da figura 2) e quatro falhas transformantes (TFAA, TFAB, TFBC e TFCD). A configuração de sistema de segmentos intratransformantes foi descrita no modelo de Wilson (1965) e Sykes (1967). Seguindo este modelo, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo estaria presente na Placa Africana. Porém, interpretamos que caso o graben tenha sido uma falha transformante no passado, atualmente é inativa. O flanco norte do graben é 1.500m mais elevado que o flanco sul e as rochas que constituem os dois flancos têm nítida diferença na forma de deformação plástica (fig. 5). Portanto, ambas as elevações não podem ser originadas da mesma cadeia peridotítica e deslocadas pela falha.

Entretanto, o graben acima citado tem 5km de largura e 1.200m de profundidade relativa, sendo pequeno em comparação às falhas transformantes adjacentes (TFAA, TFAB e TFBC), em média com 15km de largura e 2.600m de profundidade relativa máxima. A profundidade absoluta na cadeia peridotítica é de 2.700m (fig. 4), sendo mais rasa que a planície abissal desta região, com 3.800m de profundidade.

Aproximadamente 25km a norte do TFCD\* (fig. 2c), ocorre uma depressão morfológica linear com comprimento total de 240km, subparalela às falhas transformantes TFDD. A metade ocidental desta depressão, segmento entre 30°25'W e 29°15'W, é aqui denominada de Segmento Oblíquo, o qual apresenta localidades com profundidades maiores que 4.400m. Por outro lado, a metade oriental desta depressão morfológica (entre 29°15'W e 28°15'W) é paralela às falhas transformantes, aqui denominadas

de Segmento Reto. Sua estrutura é ambígua devido à insuficiência de dados batimétricos.

Estes segmentos (o oblíquo e o reto) encontram-se em uma inflexão em 29°15'W. Em cerca de 110km a leste desta (28°15'W) observa-se um novo segmento intratransformante de cadeia meso-oceânica, o Segmento D (figs. 2b e 2c). Esta feição morfológica sugere que ocorreu um salto no contato da Placa Sul-Americana e da Placa Africana da posição do TFCD\* para TFDD, devido ao nascimento deste segmento.

Baseado nas observações morfotectônicas acima citadas é aqui proposto o seguinte modelo de evolução geotectônica. Antes do salto do contato de placas, existia a falha transformante TFCD entre a extremidade norte do Segmento C (Ponto A, fig. 24a) e a extremidade sul da cadeia meso-oceânica (Ponto B, fig. 24a). Esta posição corresponde aproximadamente ao graben entre a elevação norte e elevação sul da cadeia peridotítica. O sistema de falhas transformantes de São Paulo era constituído por três segmentos intratransformante: A, B e C e quatro falhas transformantes TFAA, TFAB, TFBC e TFCD. Esta configuração é a convencional, sendo a mesma sugerida por Hekinian *et al.* (2000).

O bloco peridotítico norte do graben, incluindo o ASPSP, foi milonitizado através da falha transformante TFCD. O bloco sul composto por peridotito não deformado forma um *megamullion*. O segmento da falha transformante formava uma depressão morfológica linear (fig. 24a).

Posteriormente ao desenvolvimento do Segmento D, ocorreu o salto do contato de placas, cerca de 25km a norte. A falha transformante TFCD transformou-se em zona de fratura abissal (TFCD\*) devido à perda de movimento relativo. O novo contato de placas (falha transformante TFDD) esteve entre os pontos D e B da figura 24b, ligeiramente oblíquo ao movimento relativo das placas com uma diferença de 5°. Desta forma, de acordo com o movimento transcorrente, surgiu o esforço de compressão perpendicular ao Segmento Oblíquo, com direção aproximada de norte-sul e ligeira tendência de NNW-SSE. Essa compressão causou o tectonismo rúptil de soerguimento, formando a elevação morfológica da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo. Tal feição é conhecida em falhas transcorrentes ativas e denominada cadeia de pressão (Unsworth *et al.*, 1997; Burford e Harsh, 1980; Garfunkel *et al.*, 1981 e Goldfinger *et al.*, 1996). Devido à compressão norte-sul, as rochas ultramáficas da zona de fratura foram comprimidas e, conseqüentemente, soerguidas. A depressão linear

Figura 24

Ilustrações esquemáticas para a origem e a evolução geotectônica da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial: a) antes de 8 Ma, três segmentos da cadeia meso-oceânica da configuração convencional; b) em torno de 8 Ma, surgimento do Segmento D e o salto do contato das placas de TFCD\* para TFDD. O trecho oblíquo gera a compressão norte-sul e o consequente soerguimento da cadeia peridotítica e c) presente estado, com o soerguimento acelerado da cadeia peridotítica.

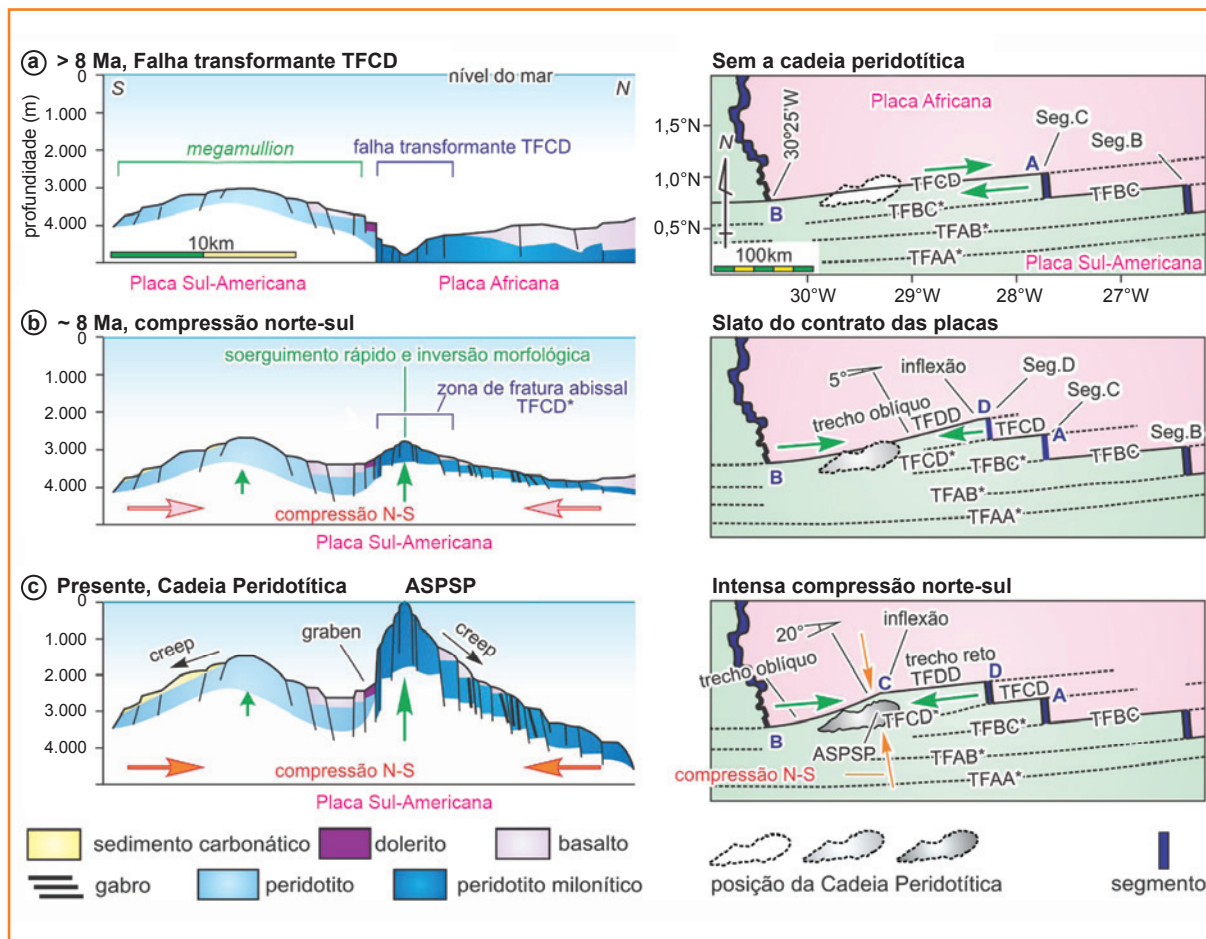


Figure 24

Schematic illustrations for the origin and tectonic evolution of the Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge, Equatorial Atlantic Ocean: a) before 8 Ma, three segments of mid-ocean ridge of the conventional layout; b) at about 8 Ma, generation of the Segment D and plate boundary jump from TFCD\* to TFDD. The emergence of the oblique path generates north-south compression and consequent uplift of the Peridotite Ridge and c) present state, with the accelerated uplift of the peridotite ridge.

da falha transformou-se em uma elevação linear. Ao mesmo tempo, ocorreu soerguimento pequeno do megamullion da elevação sul (fig. 24b). A configuração dos segmentos e falhas transformantes não é de forma convencional, sendo um fenômeno específico e transitório.

Atualmente, de acordo com a expansão das placas a partir do Segmento D, o Segmento Reto do TFDD estendeu em 120km e o Segmento Oblíquo encurtou em 120km. A discordância angular entre a direção do Segmento Oblíquo e do movimento relativo das placas oceânicas aumentou até 20°, causando o aumento do esforço de compressão norte-sul. Esse esforço da compressão se manifesta mais fortemente na inflexão da TFDD (Ponto C da fig. 24c). O ASPSP, o ponto culminante da cadeia peridotítica, situa-se na proximidade do ponto de inflexão. Nesta localidade, as rochas ultramáficas do manto abissal foram soergidas desde a profundidade subcrustal até o nível do mar, em uma distância vertical em torno de 6km. A elevação sul também foi soergida, porém, com uma distância vertical menor aproximadamente de 1,5km.

Conforme o modelo proposto pelo presente trabalho, o ASPSP situa-se atualmente na Placa Sul-Americana. Considerando o comprimento do Segmento Reto de 120km e a taxa de expansão da cadeia meso-oceânica de 1,5cm/ano para cada lado, estima-se que o Segmento D surgiu em torno de 8 Ma. Com base na taxa de soerguimento atual de 1,5cm/ano, calcula-se que o tectonismo continuou por pelo menos 4 Ma. A diferença é justificada pela aceleração gradativa de taxa de soerguimento causada pelo aumento gradativo da diferença angular entre o Segmento Oblíquo e a direção de movimento relativo das placas oceânicas.

A taxa de soerguimento aumentará conforme o aumento da diferença angular, até o ponto de inflexão C chegar à cadeia meso-oceânica de 30°25'W (fig. 24, Ponto B). Pelos cálculos atuais, esta previsão ocorrerá em 8 Ma. Nesta época, o Segmento Oblíquo desaparecerá, o tectonismo de soerguimento encerrará e a cadeia peridotítica entrará na fase de subsidência isostática. A fase transitória terminará, os segmentos intratransformantes e as falhas transformantes serão configurados na forma

convencional, constituídos por quatro segmentos e cinco falhas transformantes.

O modelo acima apresentado é consistente com as observações atualmente disponíveis.

## conclusões

Estudos geológicos, petrográficos, geoquímicos e geotectônicos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e das áreas adjacentes apresentaram os seguintes resultados:

- o Oceano Atlântico Equatorial é caracterizado pela alta densidade de zonas transformantes e manto subjacente anormalmente frio. A Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo localiza-se na Transformante de São Paulo e é composta na elevação sul por peridotitos não deformados. Enquanto na elevação norte, onde aflora o arquipélago, é composta por peridotitos fortemente milonitizados;
- a altitude da plataforma de abrasão marinha flandriana da cadeia peridotítica e as datações  $^{14}\text{C}$  para os fósseis de algas calcáreas indicam uma taxa de soerguimento de 1,5mm/ano nos últimos 6.000 anos;
- as rochas peridotíticas não serpentinizadas mostram uma pequena variação no teor de MgO e os serpentinizados apresentam grande variação.  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  diminuem conforme o aumento de MgO, devido à serpentinação. Ambos os peridotitos são enriquecidos em U, Th, Ba e elementos terras raras leves;
- a razão isotópica de Os aponta a existência de materiais originados de manto depletado, com idades modelo de 0,32 Ga a 1,1 Ga. A variação nos conteúdos de Re, Os e Pt sugere que o manto foi metassomatizado por fluidos originados possivelmente de uma zona de subducção pretérita;
- o enriquecimento de gases nobres nos peridotitos representam dois processos: a) milonitização de um manto previamente afetado por metassomatismo, principalmente na elevação norte, no limite com a Falha Transformante de São Paulo e b) serpentinação das rochas não milonitizadas da elevação sul que foram fraturadas, introduzindo elementos incompatíveis e radiogênicos (como Rb e U) durante a infiltração da água do mar;
- as fraturas tectônicas e os mecanismos focais de alguns terremotos apresentam esforço de compressão norte-sul. Esse esforço é originado da direção oblíqua entre a falha transformante e o movimento transcorrente das placas oceânicas;
- a elevação sul do maciço peridotítico é originada de um *megamullion* e foi elevada por tectonismo rúptil de compressão norte-sul, cuja atividade ainda é presente;
- a elevação norte, cujos píncaros formam o Arquipélago de São Pedro e São Paulo, foi originada pela falha transformante, resultando em rochas fortemente deformadas. As rochas do manto abissal desse maciço foram comprimidas pela compressão norte-sul e soerguidas desde a profundidade do manto subcrustal até o atual nível do mar;
- o tectonismo peculiar da área estudada pode dever-se ao surgimento de um segmento intratransformante e o conseqüente salto do contato de placas oceânicas a cerca de 8 Ma. Através deste, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo foi transferido da Placa Africana para a Placa Sul-Americana;
- a compressão norte-sul e o tectonismo de soerguimento é um fenômeno específico na fase de transição do regime do sistema de falhas transformantes e segmentos de cadeia meso-oceânica, a partir de três segmentos para quatro segmentos. A duração do tempo para essa transformação deve ser de aproximadamente 16 Ma.

## agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro através do projeto da Rede de Estudos

Geotectônicos. Gostaríamos também de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Marinha do Brasil pela logística e suporte financeiro através do Programa Arquipélagos e Ilhas Oceânicas.

## referências bibliográficas

AIRES, J. R.; MOTOKI, A.; MOTOKI, K. F.; MOTOKI, D. F.; RODRIGUES, J. G. Análises geomorfológicas do Platô de Teresópolis e da Serra do Mar, RJ, com o auxílio de seppômen e ASTER GDEM e sua relação aos tectonismos cenozóicos. **Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 2, p. 105-123, 2012.

ANDERSON, R. N.; SCLATER, J. G. Topography and evolution of the East Pacific Rise between 5°S and 20°S. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 14, n. 3, p. 433-441, Apr. 1972.

ANGEL-AMAYA, J.; SICHEL, S. E. Insights about St. Peter peridotitic ridge in the Equatorial Atlantic tectonic setting: deep upper-mantle structure with ductile and brittle deformation. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 11., 2009. **Anais...** Salvador: SBG, 2009. 1 CD-ROM.

ANGEL-AMAYA, J.; KRUIZ, M.; SICHEL, S.; CURTICE, J. He, Ne & Ar concentration in upper mantle-derived rocks, St. Peter St. Paul ridge – Equatorial Atlantic Ocean. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 7., 2010. **Anais...** Brasília: DNPM, 2010. 1 CD-ROM.

ANGEL-AMAYA, J. **Geologia e geoquímica isotópica de Sr, Pb e gases nobres (He, NE e Ar) das rochas mantélicas do maciço de São Pedro e São Paulo (Oceano Atlântico Equatorial)**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011.

BLACKMAN, D. K.; CANN, D. J. R.; JANSSEN, B.; SMITH, D. K. Origin of extensional core complexes evidence from the Mid-Atlantic Ridge at Atlantis Fracture Zone. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 103, n. B9, p. 21315-21333, Sept. 1998.

BONATTI, E.; SEYLER, M.; SUSHEVSKAYA, N. A Cold Sub-oceanic Mantle Belt at the Earth's Equator. **Science**, Washington, v. 261, n. 5119, p. 315-320, July 1993.

BRUNELLI, D.; SEYLER, M. Asthenospheric percolation of alkaline melts beneath the St. Paul region (Central Atlantic Ocean). **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 289, n. 3-4, p. 393-405, Jan. 2010.

BURFORD, O.; HARSH, P. W. Slip on the San Andreas fault in central California from alignment array surveys. **Bulletin of the Seismological Society of America**, Albany, v. 70, n. 4, p. 1233-1261, Aug. 1980.

CAMPOS, T. F. C.; VIRGENS NETO, J.; AMORIM, V. A.; HARTMANN, L. A.; PETTA, R. A. Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, p. 81-90, 2003.

CAMPOS, T. F. C.; HARTMANN, L. A.; MATA, J. M. L. S.; PETRA, R. A.; VIRGANES NETO, J. Serpentinization of ultramafic rocks from the St. Peter and St. Paul Arquipélago, Equatorial Atlantic. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 32., 2004. **Anais...** Firenze: ENI, 2004. 1 CD-ROM.

CAMPOS, T. F. C.; BEZERRA, F. H. R.; SRIVASTAVA, N. K.; VIEIRA, M. M.; VITA-FINZI, C. Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 271, n. 1-2, p. 177-186, May 2010.

CANALES, J. P.; TUCHOLKE, B. E.; COLLINS, J. A. Seismic reflection imaging of an oceanic detachment fault: Atlantis megamullion (Mid-Atlantic Ridge, 30°10'N). **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 222, n. 2, p. 543-560, May 2004.

CANDE, S. C.; LABRECQUE, J. L.; HAXBY, W. F. Plate kinematics of the South Atlantic: Chron C34 to present. **Journal of Geophysical Research**, Richmond, v. 93, n. B11, p. 13479-13492, Nov. 1988.

CANN, J. R.; BLACKMAN, D. K.; SMITH, D. K.; MCALLISTER, E.; JANSSEN, B.; MELLO, S.; AVGERIONS, E.; PASCOE, A. R.; ESCARIN, J. Corrugated slip

surfaces formed at ridge transform interactions on the Mid-Atlantic Ridge. **Nature**, New York, v. 385, n. 6614, p. 329-332, Jan. 1997.

CARBOTTE, S.; WELCH, S. M.; MACDONAL, K. C. Spreading rates, rift propagation, and fracture zone offset histories during the past 5 my on the Mid-Atlantic Ridge. **Marine Geophysical Research**, New York, v. 13, n. 1, Feb. 1991.

COUTO, E. V.; FROTES, E.; SORDI, M. V.; MARQUES A. J.; CAMOLEZI, B. A. Seppômen maps for geomorphic developments analysis: the case of Paraná plateau border, Faxinal, State of Paraná, Brazil. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 34, n. 1, p. 71-78, Jan./Mar. 2012.

DARWIN, C. R. **Geological observations on the volcanic islands, visited during the voyages of H. M. S. Beagle, with brief notices on the geology of Australia and the Cape of Good Hope, being the second part of the geology of the voyage of the Beagle**. London: Smith Elder, 1844. 175 p.

FLEMING, K.; JOHNSTON, P.; ZWARTZ, D.; YOKOYAMA, Y.; LAMBECK, K.; CHAPPELL, J. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 163, n. 1-4, p. 327-342, Nov. 1998.

GARFUNKEL, Z.; ZAK, I.; FREUN, R. Active faulting in the Dead Sea rift. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 80, n. 1-4, p. 1-26, Dec. 1981.

GOLDFINGER, C.; KULM, V. D.; YEATS, R. S.; HUMMON, C.; HUFTILE, G. J.; NIEM, A. R.; MCNEILL, R. C. Oblique Strike-Slip Faulting of the Cascadia Submarine Forearc: The Daisy Bank Fault Cone off Central Oregon. **Geophysical Monograph Series**, Subduction Top to Bottom, Washington v. 96, p. 65-74, 1996.

GRAHAM, D. W.; JENKINS, W. J.; SCHILLING, J.; G. THOMPSON, G.; KURZ, M. D.; HUMPHRIS, S. E. Helium isotope geochemistry of mid-ocean ridge basalts from the South Atlantic, **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 110, n. 1-4, p.133-147, May 1992.

GUNG, Y.; ROMANOWICZ, B. Q tomography of the upper mantle using three component long period

waveforms, **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 157, n. 2, p. 813-830, May 2004.

HEKINIAN, R.; JUTEAU, T.; GRACIA, E.; UDINTSEV, G.; SICHLER, B.; SICHEL, S. E.; APPRIOUAL, R. Submersible observations of Equatorial Atlantic Mantle: The St. Paul Fracture Zone region. **Marine Geophysical Research**, New York, v. 21, n. 6, p. 529-560, Nov. 2000.

HERRON, E. M. Sea-floor Spreading and the Cenozoic History of the East-Central Pacific, **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 83, n. 6, p. 1671-1692, June 1972.

HILTON, D. R.; BARLING, J; WHELLER, O. E. Effect of shallow-level contamination on the helium isotope systematics of ocean-island lavas. **Nature**, New York, v. 373, n. 6512, p. 330-333, Jan. 1995

KOGA, M. S. **Características da crosta oceânica baseada em imagens submarinas dos segmentos intratransformantes da Zona de Fratura de São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial**. 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado) –Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2011

KURZ, M. D.; WARREN, J. M.; CURTICE, J. Mantle deformation and noble gases: helium and neon in oceanic mylonites. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 266, n. 1-2, p. 10-18, Aug. 2009.

MELFI, A. J.; FLICOTEAUX, R. Lês coûtes phosphatées dês basaltes de l'Archipel d'Abrolhos (Bahia, Brésil): dês roches formées au quaternarie récent à partir de guanós. **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIA, Earth and Planetary Science**, Paris, v. 330, n. 3, p. 193-200, Feb. 2000.

MELSON, W. G.; JAROSEWICH, E.; BOWEN, V. T.; THOMPSON, G. St. Peter and St. Paul rocks: a high-temperature mantle-derived intrusion. **Science**, New York, v. 155, n. 3769, p. 1532-1535, Mar. 1967.

MOTOKI, A.; ZUCCO, L. L.; SICHEL, S. E.; AIRES, J. R.; PETRAKIS, G. H. Desenvolvimento da técnica para especificação digital de cores e a nova nomenclatura para classificação de rochas ornamentais com base nas cores medidas. **Geociências**, Rio Claro, v. 25, n. 4, p. 403-415, 2006.

- MOTOKI, A.; PETRAKIS, G. H.; SOARES, R. S.; SICHEL, S. E.; AIRES, J. R. New method of semi-automatic modal analyses for phenocrysts of porphyritic rocks based on quantitative digital colour specification technique. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 13-20, jan./mar. 2007.
- MOTOKI, A.; SICHEL, S. E.; CAMPOS, T. F. C.; SRIVASTAVA, N. K.; SOARES, R. S. Taxa de soerguimento atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 331-342, jul./set. 2009.
- MOTOKI, A.; CAMPOS, T. F. C.; FONSECA, V. P.; MOTOKI, K. F. Subvolcanic neck of Cabugi Peak, State of Rio Grande do Norte, Brazil, and origin of its landform. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 2, p. 195-206, jan./mar. 2012a.
- MOTOKI, A.; GERALDES, M. C.; IWANUCH, W.; VARGAS, T.; MOTOKI, K. F.; BALMANT, A.; RAMOS, M. N. The pyroclastic dyke and welded crystal tuff of the Morro dos Gatos alkaline intrusive complex, State of Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 1, p. 35-45, jan./mar. 2012b.
- OHARA, Y.; YOSHIDA, T.; KATNO, Y.; KASUGA, S. Giant megamullion in the Parece Vela Backarc Basin. **Marine Geophysical Research**, New York, v. 22, n. 1, p. 47-61, Jan. 2001.
- OLIVEIRA, F. S.; ABRAHÃO, W. A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 239-246, abr./jun. 2010.
- RITZWOLLER, M. H.; SHAPIRO, N. M.; LEAHY, G. M. A resolved mantle anomaly as the cause of the Australian-Antarctic discordance. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 108, n. B12, p. 1-16, Dec. 2003.
- RODEN, M. K.; HART, S. R.; FREY, F. A.; MELSON, W. G. Sr, Nd and Pb isotopic and REE geochemistry of St. Paul's Rocks: the metamorphic and metasomatic development of an alkali basalt mantle source. **Contributions Mineralogy and Petrology**, Berlin, v. 85, n. 4, p. 376-390, Dec. 1984.
- SCHILLING, J. G.; RUPPEL, C.; DAVIS, A. N.; McCULLY, B.; TIGHE, S. A.; KINGSLEY, R. H.; LIN, J. Thermal structure of the mantle beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge: inferences from the spatial variation of dredged basalt glass compositions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 100, n. B6, p. 10057-10076, June 1995.
- SHACKELTON, N. J. Oxygen isotope analyses, ice volume, and sea level. **Quaternary Science Reviews**, Oxford, v. 6, n. 3-4, p. 183-190, 1987.
- SICHEL, S. E. **Petrology and Geochemistry of South Atlantic Ridge Basalts and Geochemical variations along the Cameroon Line**. 1990. 537 f. Thesis (PhD) –University of Rhode Island, Kingston, 1990.
- SICHEL, S. E.; ESPERANÇA, S.; MOTOKI, A.; MAIA, M.; HORAN, M. F.; SZATMARI, P.; ALVES, E. C.; MELLO, S. L. M. Geophysical and geochemical evidence for cold upper mantle beneath the Equatorial Atlantic Ocean. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 69-86, jan./mar. 2008.
- SILVA, S. **Interpretação morfológica baseada nas técnicas de seppômen e sekkokumen dos maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- SIMÕES, L. S. A.; ANDRADE, F. G. G.; CAMPOS, T. F. C.; SICHEL, S. E.; MOTOKI, A. Padrão petroestrutural das rochas e o seu significado no contato tectônico do Atlântico Equatorial. In: VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V.; SOUZA, M. A. C. **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica**. Brasília, DF: SECIRM, 2009. p. 92-97.
- SMITH, B. J.; MCALISTER, J. J.; SICHEL, S. E.; ANGEL, J.; BAPTISTA NETO, J. A. Ornithogenic weathering of an ultramafic plutonic rock: St. Peter and St. Paul Archipelago, Central Atlantic. **Environmental Earth Sciences**, Berlin, v. 66, n. 1, p. 183-197, May 2012.
- SYKES, L. R. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges. **Journal of**



**Geophysical Research**, Richmond, v. 72, n. 8, p. 5-27, 15 Apr. 1967.

STAUDACHER, T.; SARDA, P.; RICHARDSON, S. H.; ALLEGRE, C. J.; SAGNA, I.; DMITRIEV, L. V. Noble gases in basalt glasses from a Mid-Atlantic Ridge topographic high at 14 N: geodynamic consequences. **Earth and Planetary Science Letter**, Amsterdam, v. 96, n.1-2, p. 119-133, Dec. 1989

THOMPSON, G. **St. Peter and St. Paul's Rocks (equatorial Atlantic) and the surrounding sea floor. Wood Hole Oceanography Institution Technical Reports**. Washington, DC: Wood Hole Oceanographic Institution, 1981. 35 p.

TILLEY, C. E. The dunite-mylonite of St. Paul's rocks (Atlantic). **American Journal of Science**, New Haven, v. 245, n. 8, p. 483-491, Aug. 1947

TUCHOLKE, B. E.; LIN, J.; KLEINROCK, M. C. Megamullions and mullion structure defining oceanic metamorphic core complex on the Mid-Atlantic Ridge. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 103, n. B5, p. 9857-9866, May 1998.

TUCHOLKE, B. E.; FUJIOKA, K.; ISHIHARA, T.; HIRTH, G.; KINOSHITA, M. Submersible study of an oceanic megamullion in the Central North Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 106, n. B8, p. 16145-16161, Aug. 2001.

TUCHOLKE, B. E.; BEHN, M. D.; BUCK, W. R.; LIN, J. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions. **Geology**, Boulder, v. 36, n. 6, p. 455-458, June 2008.

UDINTSEV, G. B. (Ed.) **Equatorial Segment of the Mid-Atlantic Ridge**. Paris: UNESCO, 1996. (IOC Technical Series, n. 46).

UNSWORTH, M. J.; MALIN, P. E.; EGBERT, G. D.; BOOKER, J. R. Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. **Geology**, Boulder, v. 25, n. 4, p. 359-362, Apr. 1997.

WHITMARSH, R. B.; MANATSCHAL, G.; MINSHULL, T. A. Evolution of magma-poor continental margins from rifting to seafloor spreading. **Nature**, New York, v. 413, n. 6852, p. 150-154, Sept. 2001.

WILSON, J. T. A new class of faults and their bearing on continental drift. **Nature**, New York, v. 207, n. 4995, p. 343-347, July 1965.

WOLFE, C. J.; BERGMAN, E. A.; SOLOMON, S. C. Oceanic transform earthquakes with unusual mechanism or locations: relation to fault geometry and state of stress in the adjacent lithosphere. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, Richmond, v. 98, n. B9, p. 16187-16211, Sept. 1993.

## bibliografia

ALMEIDA, F. F. M. As ilhas oceânicas brasileiras e uma hipótese sobre a origem do Atlântico. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 37, p. 141-145, 1965. Suplemento.

BONATTI, E. Serpentine protrusions in the oceanic crust. **Earth Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 107-113, Oct. 1976.

BONATTI, E. Vertical tectonism in oceanic fracture zones. **Earth Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 37, n. 3, p. 369-379, Jan. 1978.

CANDE, S. C.; MUTTER, J. C. A revised identification of the oldest sea-floor spreading anomalies between Australia and Antarctica. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 58, n. 2, p. 151-160, Apr. 1982.

GORINI, M. A. The geotectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil. In: ASMUS, H.E. (Ed.) **Estruturas e tectonismos da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais**. Rio de Janeiro: Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (Cenpes), Divisão de Informação Técnica e Propriedade Industrial (DINTEP), 1981. p. 11-16. (Série Projeto Remac, 9).

LANCET, M. S.; ANDRES, E. Carbon isotope fractionation in the Fischer-Tropsch Synthesis and in Meteorites. **Science**, New York, v. 170, n. 3961, p. 980-982, Nov. 1970.

MULLER, R.; SDROLIAS, M.; GAINA, C., ROEST, W. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. **Geochemistry Geophysics Geosystems**, Malden, v. 9, n. 4, p. 1-19, Apr. 2008.

SMITH, W. H. F.; D. T. SANDWELL. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science**, New York, v. 277, n. 5334, p. 1956-1962, Sept. 1997.

YOSHIDA, T.; NISHIZAWA, K.; TABATA, M.; ABE, H.; KODAMA, T.; TSUJI, M.; TAMAURA, Y. Methanation of CO<sub>2</sub> with H<sub>2</sub>-reduced magnetite. **Journal of Material Science**, Washington, DC, v. 28, n. 5, p. 1220-1226, Mar. 1993.

## webgrafia

CAMPOS, T. F. C.; VIRGENS NETO, J.; SRIVASTAVA, N. K.; PETTA, R. A.; HARMANN, L. A.; MORAES, J. F. S.; MENDES, L.; SILVEIRA, S. R. M. Arquipélago de São Pedro e São Paulo, soerguimento tectônico de rochas infracrustais no Oceano Atlântico. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S. (Eds.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, SIGEP 002, 2005. Disponível em: < <http://sigep.cprm.gov.br/sitio002/sitio002.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 2006.

## expanded abstract

*This paper shows results of the petrology, geochemistry, structural, and geotectonics studies of the Saint Peter and Saint Paul Massif e Islets, Equatorial Atlantic Ocean, with special attention to the origin and evolution of the abyssal mantle peridotite. The exposed rocks represents exhumated mantle with undeformed and mylonite peridotite, which textures formed by brittle-ductile deformation. This is the only one locality of the Atlantic Ocean in where abyssal mantle is exposed above sea level.*

*The islets are situated on the top of a morphologic elevation which is 100km long, 20km wide, and 3.800km high, named Saint Peter and Saint Paul Peridotite Massif. The southern slope of this peridotite massif is constituted by undeformed peridotites made up of olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, hornblende, kaersutite, and spinel. The north elevation, which includes the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, is composed of intensely deformed serpentized peridotite.*

*The petrographic observations demonstrate strong fluid influence originated from metasomatism and hydrothermalism. The undeformed rocks and non-serpentized ones have a small MgO variation, 36% to 37%. On the other hand, the serpentized peridotite shows a large variation, 36% to 49%. The contents of  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , CaO,  $Na_2O$ , and  $K_2O$  decrease with the increase of MgO content, due to the serpentization. The volatile contents for the undeformed peridotite are greater than 11%.*

*The abyssal mantle in this area is characteristically enriched in U, Th, Ba, and Light Rare Earth Elements, as well as Noble Gases. The Os isotopic ratio of the peridotites points out the existence of materials originated from depleted mantle with model age of 0.32 Ga and 1.1 Ga. The Re, Os, and Pt variation*

*suggests that the mantle was metasomatized by the fluids originated possibly from former subduction zone.*

*The peridotite ridge suffered an intense tectonic uplift. The Flandrian wave-cut bench is present at the altitude of 7m to 9m, indicating an uplift rate of 1.5mm/year in the last 6.000 years. The  $^{14}C$  dating for the coral fossils points out the same rate.*

*The tectonic fractures on the Archipelago form a conjugate system of north-south compression. Focal earthquakes mechanisms also indicate the compression in the same direction. This compression force is responsible for the Saint Peter Saint Paul uplift, approximately 4.000m high.*

*It is considered that the compression stress is originated from the oblique direction between the transform fault and the strike-slip movement of the oceanic plates. In this sense, the peridotite ridge corresponds to the pressure ridge related to the strike-slip movement of Saint Paul Transform Fault.*

*The brittle-ductile phase, mylonite structure, observed on Saint Peter and Saint Paul Rocks are steeply dipped, 50° to 70°. Its direction is widely variable ranging from NE-SW to NNW-SSE. This structural perturbation could be originated from the formation of a new ridge segment.*

*The equatorial region of the Atlantic Ocean is underlain by low-temperature mantle and some abyssal mantle exposures are present in the Saint Paul transform fault zone forming megamullions. The south elevation of the Saint Peter and Saint Paul Peridotite Ridge is originated from a megamullion and it was slightly uplifted by the north-south compression. The north elevation, including the Saint Peter and Saint Paul Rocks, is originated from an old transform fault and it was strongly deformed by the compression tectonics. This peculiar tectonism is due to the born of a new intra transform segment. In consequence, occurred a plate boundary jump of about 25km to the north.*

## autores



**Susanna Eleonora Sichel**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geologia

[susannasichel@id.uff.br](mailto:susannasichel@id.uff.br)

**Susanna Eleonora Sichel** possui graduação e mestrado em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e doutorado em Geologia pela Oceanography at the Graduate School of Oceanography of the University of Rhode Island, USA. Trabalha na Universidade Federal Fluminense (UFF). Especializada em Geologia Oceanográfica do Oceano Atlântico Equatorial, Petrologia e Geoquímica das rochas mantélicas e Petrologia de rochas alcalinas. Coordenadora do projeto “Origem e evolução das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial” da Rede Tectônica, financiado pela Petrobras. Nos últimos cinco anos, foram publicados 18 artigos, um artigo aceito e 3 capítulos de livro.



**Akihisa Motoki**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
Departamento de Mineralogia e Petrologia  
Ígnea (DPMI)

[rochasornamentais@yahoo.com.br](mailto:rochasornamentais@yahoo.com.br)

**Akihisa Motoki** possui graduação e mestrado em Geologia pela Faculty of Science, Kobe University, Japan. Doutorado em Geologia pelo Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). Trabalha na Universidade do Estado do Rio de Janeiro no Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea (UERJ/DMPI). Especializado em Petrologia e Geoquímica de rochas alcalinas félsicas, Vulcanologia de erupções explosivas, Geomorfologia e Geotectônica do fundo do oceano e Geologia de jazidas de rochas ornamentais. Vice-coordenador do projeto da Rede de estudos Geotectônicos - “Origem e evolução das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial”. Nos últimos cinco anos, foram publicados 22 artigos, três artigos aceitos e três capítulos de livro.



**Thomas Ferreira da Costa Campos**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)  
Departamento de Geologia

[thomascampos@geologia.ufrn.br](mailto:thomascampos@geologia.ufrn.br)

**Thomas Ferreira da Costa Campos** possui graduação em Geologia pela Universidade do Porto, mestrado em Geociências pela Universidade de Aveiro e doutorado em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor Associado III da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Atua na área de Geociências, com ênfase em Petrologia/Geoquímica e Geologia Médica. Coordenou o projeto de pesquisa “Prospecção de urânio na Região da Beira-Baixa Portuguesa” dos Serviços de Fomento Mineiro da Direção-Geral de Geologia e Minas (DGGM) de Portugal. Coordena e vice-coordena diferentes projetos de pesquisa sobre a Evolução Geológica do Arquipélago São Pedro e São Paulo (ASPSP). Coordena o Laboratório de Radioatividade Natural (Larana) da UFRN.



**Thais Cristina Vargas Garrido**  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)  
Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea (DPMI)

[thais@uerj.br](mailto:thais@uerj.br)

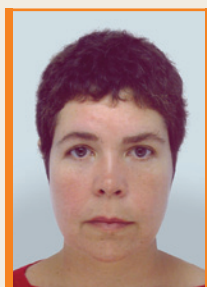
**Thais Cristina Vargas Garrido** possui graduação e mestrado em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e doutorado em Geologia pelo Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (Lagemar/UFF). Trabalha no Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DMPI/UERJ). Especializada em petrologia e geoquímica de rochas ígneas e geologia de jazidas de rochas ornamentais.



**Jennifer Angel-Amaya**  
GMAS Soluciones Geocientíficas  
Bogotá - Colômbia

[jangelmaya@gmail.com](mailto:jangelmaya@gmail.com)

**Jennifer Angel-Amaya** possui graduação em Geologia pela Universidad Nacional de Colombia, mestrado em Petrologia, Geoquímica e Isótopos de Gases Nobres pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI). Atualmente é responsável pela Geoquímica da GMAS Soluciones Geocientíficas, Bogotá - Colômbia.



**Marcia Maia**  
Universitaire de Bretagne Occidentale (UBO)  
Institut Universitaire de Européen de La Mer (IUEM)  
Brest - França

[marcia@univ-brest.fr](mailto:marcia@univ-brest.fr)

**Marcia Maia** possui graduação em Geologia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), doutorado em Ciências Geofísicas pela Université de Paris XI, Orsay, and the Habilitation à Diriger des Recherches from the Université de Bretagne Occidentale (UBO), França. Trabalha no Institut Universitaire Européen de La Mer (IUEM) Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, França. Especializada em Geologia e Geofísica de *mantle core complex*.



**Mark David Kurz**

Massachusetts Institute of Technology (MIT)  
Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)  
Department of Marine Chemistry and  
Geochemistry

[mkurz@whoi.edu](mailto:mkurz@whoi.edu)

**Mark David Kurz** possui graduação em Química pela University of Wisconsin, Ph.D., Geochemistry, integra o Joint Program in Oceanography, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution (MIT/WHOI). Pesquisas atuais em isótopos de gases nobres e história da degasificação terrestre, migração de gases na crosta oceânica e continental. Chair and Education Coordinator (Chemical Oceanography) WHOI. Possui 27 artigos publicados e é chefe científico em quatro Cruzeiros Oceanográficos.



**José Antonio Baptista Neto**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geologia

[jabneto@id.uff.br](mailto:jabneto@id.uff.br)

**José Antonio Baptista Neto** é graduado em Geografia (1990), especialização (1990) e mestrado (1993) em Geologia e Geofísica Marinha pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e doutorado em Geociências (1996) na Queen's University, Belfast/Reino Unido. Professor Adjunto do Departamento de Geologia da Universidade Federal Fluminense (UFF), atuando na área de Geologia Ambiental, Geoquímica e Geologia Sedimentar. É pesquisador de produtividade 1D do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).



**Mauro Satake Koga**

Cepemar - Serviços de Consultoria em  
Meio Ambiente

[koga.wave@gmail.com](mailto:koga.wave@gmail.com)

**Mauro Satake Koga** é formado em Oceanologia pela Fundação Universidade Federal de Rio Grande (FURG). Mestre em Geologia e Geofísica Marinha pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Durante o projeto de mestrado desenvolveu dissertação sobre os segmentos de cordilheira intratransformantes da Zona de Fratura de São Paulo. Desde fevereiro de 2011, trabalha como Analista Ambiental na Cepemar - Serviços de Consultoria em Meio Ambiente. Participou de várias campanhas de monitoramento ambiental das unidades de produção *offshore* da Petrobras a bordo do R/V Seward Johnson. Atualmente integra o time do R/V Ocean Stalwart que realiza levantamentos geofísicos na área da Cordilheira Mesoatlântica, a serviço da Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais (CPRM), para mapeamentos de depósitos sulfetos metálicos.

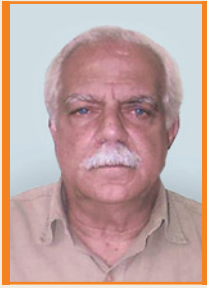


**Kenji Freire Motoki**

Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geologia

[kenji\\_dl@hotmail.com](mailto:kenji_dl@hotmail.com)

**Kenji Freire Motoki** possui graduação em Geofísica pelo Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (Lagemar/UFF). Especializado em Geomorfologia e Gravimetria do Oceano Atlântico Equatorial.



**Marcus Aguiar Gorini**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geologia

[mgorini@uol.com.br](mailto:mgorini@uol.com.br)

**Marcus Aguiar Gorini** possui graduação em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), *Master of Philosophy* (M. Phil.) and *Philosophical Doctor* (PhD) em Geologia e Geofísica Marinha pela Universidade de Columbia, junto ao *Lamont-Doherty Geological Observatory*, em Nova Iorque. Professor do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense (UFF) da disciplina de Geotectônica. Membro do Grupo Executivo do Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (Leplac). Diretor-Presidente da empresa Mar, Ambiente e Geologia Consultoria Ltda. (MAG).



**Peter Szatmari**  
Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)  
P&D em Geociências  
Gerência de Geologia Estrutural e Geotectônica

[szatmari@petrobras.com.br](mailto:szatmari@petrobras.com.br)

**Peter Szatmari** obteve seu MSc em Geologia na Universidade Eotvos em Budapest, Hungria e seu Ph.D na Universidade de Edinburg no Reino Unido. Trabalhou nos Estados Unidos estudando jazidas evaporíticas estratificadas em Ohio, Michigan e New York e domos de sal na Louisiana. Orientou a abertura da mina de potássio em Sergipe. Mapeou a estrutura e recomendou a linha sísmica e a perfuração que descobriu os hidrocarbonetos na Bacia de Solimões. Ministrou cursos regulares na Petrobras e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) sobre Evaporitos, Geologia Estrutural e Tectônica, organizou com Frank Falkenheim a pós-graduação em Ouro Preto (UFOP) e orientou numerosas teses de mestrado e doutorado. Montou e orientou o Laboratório de Modelagem Tectônica no Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes). Estudou o rifteamento sul-atlântico e seus depósitos de sal. Investigou o papel da serpentinização do manto na origem do petróleo. Foi editor associado do *Bulletim da AAPG* e da *Marine and Petroleum Geology*.

